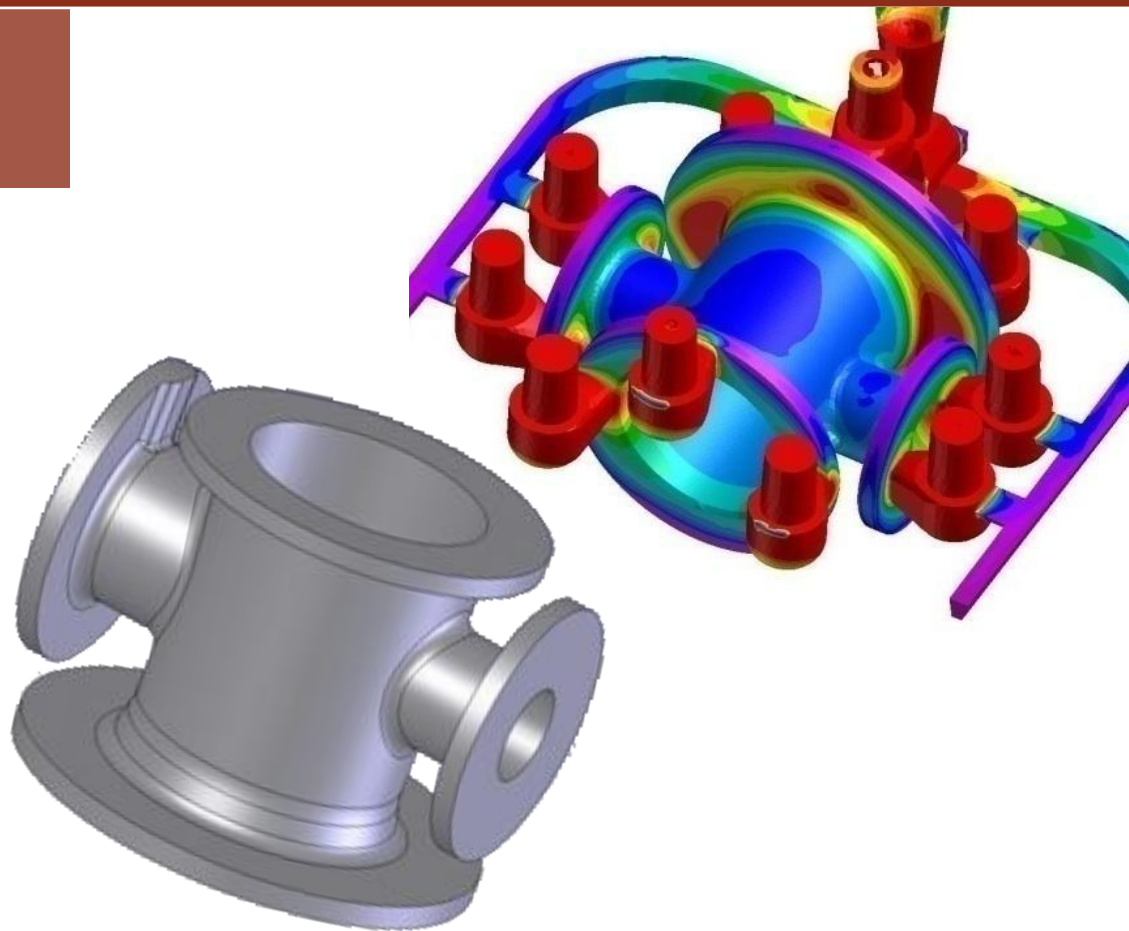


Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica
e de Materiais

Utilização do software ProCast no projecto de alimentação e gitagem de uma peça de aço vazado



Realizado por:

Daniel Casanova P.M. Oliveira

Orientado na FEUP por:

Prof. C A Silva Ribeiro

Orientado na empresa por:

Eng.º Cláudio Campos

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Utilização do software ProCast no projecto de alimentação e gitagem de uma peça de aço vazado

Daniel Casanova Pinto Martins de Oliveira

Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Dissertação realizada sob a supervisão do

Professor Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro,

do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

e do Eng.º Cláudio Miguel Moreira Campos,

da empresa Fundição do Alto da Lixa, S.A.

Porto, Setembro de 2009

<i>CANDIDATO</i>	Daniel Casanova Pinto Martins de Oliveira	<i>Código</i>	010508006
<i>TÍTULO</i>	Utilização do software ProCast no projecto de alimentação e gitagem de uma peça de aço vazado		
<i>DATA</i>	25 de Setembro de 2009		
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala C-603- 10.30h		
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Professor Doutor Manuel Fernando Gonçalves Vieira	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	Professor Doutor José Joaquim Carneiro Barbosa	DEM/EEUM
	<i>Orientador</i>	Professor Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro	DEMM/FEUP

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de exprimir o meu profundo agradecimento aos meus orientadores Professor Doutor C.A. Silva Ribeiro, na FEUP e Engenheiro Cláudio Campos, na FAL, pelos seus conselhos e por partilharem os seus conhecimentos. Gostaria também de agradecer a toda a minha família por todo o incentivo dado e pelas condições que me deram para que conseguisse realizar não só este trabalho mas também todo o meu percurso académico. Aos meus amigos e, em especial, ao Pedro Trigo, Cláudia Lopes, Pedro Cardoso, Pedro Rocha, Natércia Silva e Tito Garrido agradeço o apoio, paciência e boa disposição.

Resumo

Esta tese, inserida no Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, foi efectuada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Especificamente, este projecto consistiu na aprendizagem e aplicação a um caso prático, proveniente da Fundação do Alto da Lixa, de um recente software de simulação de enchimento e solidificação, de nome ProCast. Com este software pretendeu-se criar um sistema de alimentação e gitagem de uma peça em aço inoxidável austenítico do tipo A297-HF, segundo a norma ASTM que gerasse, após validação, um produto isento de defeitos de enchimento e solidificação ou, que no caso da sua existência, não compromettesse a sua integridade em serviço.

No que diz respeito à simulação, foram variados os coeficientes de transferência de calor entre as várias interfaces do modelo simulado e efectuou-se uma validação experimental para confirmação de resultados.

Os objectivos foram atingidos na medida em que com o sistema de alimentação e gitagem projectado conseguiu-se produzir um produto isento de porosidade nas flanges.

Abstract

This thesis was integrated on Master in Metallurgical and Materials Engineering and was elaborated in Engineering Faculty of University of Porto.

Specifically, this work consisted in learning and in the application of a new software for simulation of filling and solidification, named ProCast, to a case of study from the Fundação do Alto da Lixa, S.A.

With this software, it was intended to create a feeding and gating system of a A297-HF stainless steel casting so that, after validation, could lead to a casting free from defects of filling and solidification. In the case of its existence, those defects should not compromise the casting's integrity in service.

Regarding the simulation, there were used different heat transfer coefficients between the different interfaces of the simulated model. In the end, it was made a validation test in order to confirm the results obtained in ProCast.

The casting was free of microporosity in some locals identified on this thesis so it is possible to say that the main goals have been achieved.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice de figuras	v
Índice de tabelas	viii
1. Introdução	1
1.1. Apresentação da empresa	1
2. Revisão bibliográfica	2
2.1. Enchimento da cavidade de moldação	2
2.1.1. Sistema de gitagem	2
2.1.2. Princípios básicos da dinâmica de fluidos	3
2.1.3. Características do fluxo	5
2.1.4. Velocidade crítica de enchimento	6
2.2. ProCast	7
2.2.1. Propriedades do material em estudo	8
3. Metodologia Experimental	11
3.1. Equipamento utilizado	11
3.2. Início do projecto	11
3.3. Análise da peça em estudo	12
3.4. Informações necessárias para as simulações	15
4. Apresentação e Discussão de Resultados	16
4.1. Parte I	19
4.2. Parte II	27
5. Validação Experimental	40
6. Conclusões	45
Referências bibliográficas	48
Anexos	49

Índice de figuras

Figura 1. Esquematização de um sistema de alimentação [4].	2
Figura 2. Adaptação do teorema de Bernoulli ao sistema de gitagem [4].	3
Figura 3. Perfil do fluxo metálico: a) em queda livre; b) dentro de um gito de paredes paralelas; c) dentro de um gito cónico [4].	4
Figura 4. Efeito do momento no perfil do fluxo no interior dos canais [4].	5
Figura 5. Características do fluxo: a)laminar; b)misto; c)turbulento [4].	6
Figura 6. Turbulência superficial em metais líquidos [5].	6
Figura 7. Esquema dos passos a seguir para visualização de uma simulação obtida em ProCast.	7
Figura 8. Introdução da liga a estudar e aplicação do modelo térmico requerido.	9
Figura 9. Propriedades térmicas da liga obtidas após o modelo térmico escolhido.	10
Figura 10. Esquematização do seguimento dado no trabalho.	11
Figura 11. Localização dos pontos quentes da peça obtidos no SolidCast, utilizando a função “hot spot” com valor igual a 1,2.	12
Figura 12. Identificação das secções da peça em estudo.	13
Figura 13 e 14. Vista da peça, em corte, onde estão salientadas as zonas alteradas.	16
Figura 15 e 16. Análise da macroporosidade, apresentada em VisualCast	19
Figura 17. Análise da microporosidade, visualizada em VisualCast.	20
Figura 18 e 19. Análise de macroporosidade em SolidCast.	20
Figura 20 e 21. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.	22
Figura 22 e 23. Análise da macroporosidade em SolidCast e ProCast, respectivamente.	23
Figura 24 e 25. Análise da macroporosidade em SolidCast e ProCast, respectivamente.	23
Figura 26 e 27. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.	24
Figura 28 e 29. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.	25
Figura 30 e 31. Análise da microporosidade, visualizada em VisualCast.	25
Figura 32 e 33. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.	26
Figura 34 e 35. Perda de temperatura do banho metálico na passagem pelo filtro.	27

Figura 36 e 37. Gráfico da variação temperatura/HTC entre a areia de moldação e o fundido; Valores utilizados para criação da curva.	28
Figura 38 e 39. Gráfico da variação HTC/tempo para o filtro; Valores utilizados para criação da curva.	28
Figura 40 e 41. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.	29
Figura 42 e 43. Análise da microporosidade, visualizada em VisualCast.	29
Figura 44 e 45. Velocidade do fluido nos ataques (m/s).	30
Figura 46 e 47. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.	30
Figura 48 e 49. Análise da microporosidade, visualizada em VisualCast.	31
Figura 50. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.	31
Figura 51. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.	32
Figura 52 e 53. Velocidade do fluido nos ataques (m/s).	32
Figura 54 e 55. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.	33
Figura 56 e 57. Análise da microporosidade, visualizada em VisualCast.	33
Figura 58. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.	34
Figura 59. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.	34
Figura 60 e 61. Velocidade do fluido nos ataques (m/s).	35
Figura 62 e 63. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.	35
Figura 64 e 65. Análise da microporosidade, visualizada em VisualCast.	36
Figura 66. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.	36
Figura 67. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.	37
Figura 68 e 69. Velocidade do fluido nos ataques (m/s).	37
Figura 70 e 71. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.	38
Figura 72 e 73. Análise da microporosidade, visualizada em VisualCast.	38
Figura 74. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.	39
Figura 75. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.	39
Figura 76. Cacho após desmoldação.	40
Figura 77. Pormenor do gito e poço de vazamento.	40

Figura 78. Pormenor de uma fissura na zona interior da peça.	41
Figura 79. Ampliação da zona fissurada no interior da peça.	41
Figura 80. Zonas fissuradas no interior da peça.	42
Figura 81. Zona fissurada no interior da peça.	42
Figura 82. Pormenor da flange W após maquinagem.	43
Figura 83. Pormenor da flange X após maquinagem.	43
Figura 84. Pormenor da flange Y após maquinagem.	43
Figura 85. Pormenor da flange Z após maquinagem.	44

Índice de tabelas

Tabela I. Algumas propriedades físicas da liga A297-HF utilizadas para criação de uma entrada na base de dados no ProCast.	8
Tabela II. Composição química da liga A297-HF utilizada para criação de uma entrada na base de dados no ProCast.	8
Tabela III. Valores referentes ao cálculo do volume dos alimentadores respeitando a situação i).	13
Tabela IV. Número de alimentadores necessários para alimentar as diferentes secções da peça em estudo.	14
Tabela V. Valores referentes ao cálculo do volume dos alimentadores respeitando a situação ii).	14
Tabela VI. Número de alimentadores necessários para alimentar as diferentes secções da peça em estudo.	15
Tabela VII. Dimensões da caixa de moldação utilizada.	15
Tabela VIII. Resumo do conteúdo da parte I.	17
Tabela IX. Resumo do conteúdo da parte II.	18
Tabela X. Parâmetros de simulação para a hipótese 1.	19
Tabela XI. Parâmetros de simulação para a hipótese 3.	21
Tabela XII. Parâmetros de simulação para a hipótese 4.	22
Tabela XIII. Parâmetros de simulação para a hipótese 5.	24
Tabela XIV. Parâmetros de simulação para a hipótese 6.	25
Tabela XV. Parâmetros de simulação para a hipótese 7.	26
Tabela XVI. Parâmetros de simulação para a hipótese 8.	29
Tabela XVII. Parâmetros de simulação para a hipótese 9.	30
Tabela XVIII. Parâmetros de simulação para a hipótese 10.	32
Tabela XIX. Parâmetros de simulação para a hipótese 11.	35
Tabela XX. Parâmetros de simulação para a hipótese 12.	37
Tabela XXI. Valores referentes à análise de forma da peça.	49

Tabela XXII. Valores referentes à espessura equivalente das junções com respectivos módulos.	49
Tabela XXIII. Valores calculados para o gito de descida.	50
Tabela XXIV. Valores calculados para os canais de distribuição.	50
Tabela XXV. Valores calculados para os ataques.	50

1. Introdução

Este trabalho surgiu a convite da FAL, Fundação do Alto da Lixa, S.A. no sentido de aumentar a eficiência de alimentação de uma peça em aço inoxidável denominada “*Corp d’air*”, utilizando para o efeito um novo software de simulação de enchimento e solidificação, o *ProCast*. Estes problemas traduziam-se no aparecimento de fissuras em zonas críticas da peça e de microporosidades nas flanges, que deveriam ser eliminadas. Deste modo foi necessária toda uma aprendizagem do potencial deste recente software que promete ser uma mais-valia para a indústria da fundição, dadas as potencialidades que o caracterizam.

1.1. Apresentação da empresa

A Fundação do Alto da Lixa, S.A., foi fundada em 14 de Outubro de 1977, denominada na altura de Neves & Leonel, Lda. Com a modernização do sector de fundição e com o desenvolvimento da empresa, em 1993 e após um forte investimento na mesma, esta passou a ser redenominada para Fundação do Alto da Lixa, S.A., estando preparada assim para o fabrico de qualquer componente em Aço e Ferro fundido.

A FAL foi certificada pela entidade internacional TUV-SUDDEUTSCHLAND, segundo AD-Merkblatt WO/TRD 100. A FAL tem um Sistema de Gestão da Qualidade certificado segundo a norma NP ISSO 9001:200 pela TUV Rheinlan Portugal desde 3 de Março de 2006. A expansão da empresa passará pelo mercado externo onde já canaliza directamente 45% e indirectamente 80% do seu volume de negócios.

O processo tecnológico implementado é a fundição por gravidade em moldação de areia auto-secativa. A FAL utiliza como primeiro passo do processo de fabrico, o estudo do processo e determinação dos métodos de fabrico. A empresa reconhece o importante papel da tecnologia na redução dos prazos de entrega e na redução dos custos de produção, recorrendo deste modo a simuladores como o SOLIDCast.

A capacidade de fusão da FAL reside na utilização de quatro fornos de indução magnética com as seguintes capacidades:

- um forno de 1500kg;
- dois fornos de 500kg;
- Um forno de 250kg usado na produção de ligas especiais.

Na empresa, a composição química do banho é assegurada por espectrometria de emissão óptica.

Com estes fornos, a FAL tem a capacidade e a flexibilidade de produzir peças com pesos que podem variar entre os 0,5kg e os 2200kg (peça acabada).

2. Revisão bibliográfica

2.1. Enchimento da cavidade de moldação

Um factor com grande importância na qualidade final do fundido é o enchimento da cavidade de moldação, que deverá ter especial atenção quando se trata de um processo por gravidade e se a liga utilizada for reactiva [1,2].

Com o decorrer do vazamento, podem misturar-se com o metal determinadas impurezas como é o caso de areias, óxidos, escórias e gases, fazendo com que, no fim, o fundido se degrade e apresente defeitos visuais.

2.1.1. Sistema de gitagem

O sistema de enchimento não é mais do que todo o conjunto de canais que irá transportar o metal líquido do exterior até à cavidade moldante. O sistema de gitagem tem grande importância na medida em que deverá promover um enchimento suave e não turbulento de modo a reter a escória na bacia de vazamento, evitando assim que o metal reaja em demasia com a atmosfera ou moldação. O sistema de gitagem deve também garantir uma distribuição de metal a todas as partes da cavidade de moldação e garantir que haja uma distribuição de temperaturas adequada no arrefecimento e solidificação do metal [1,3].

O grande desafio de quem projecta sistemas de alimentação em fundição por gravidade é garantir que o metal vazado entre de um modo suave na cavidade de moldação [3].



Figura 1. Esquematização de um sistema de alimentação [4].

A figura 1 esquematiza um sistema de alimentação típico, constituído por bacia de vazamento, gito de descida, poço, canal de distribuição e ataques. As dimensões e geometria dos canais são muito importantes para garantir o controlo do fluxo de metal [4].

Deste modo existem alguns pontos que deverão ser considerados na elaboração de um sistema de gitação:

- Velocidade de enchimento da moldação;
- Maximização do rendimento metálico;
- Facilidade de remoção dos ataques;
- Evitar distorções;
- Compatibilidade dos métodos de moldação e de vazamento;
- Promover, após enchimento da cavidade, os gradientes térmicos adequados à solidificação.

2.1.2. Princípios básicos da dinâmica de fluidos

A concepção de um sistema de enchimento deverá ter em conta certos fundamentos relativos à dinâmica de fluidos.

Nos pontos seguintes serão apresentadas algumas considerações teóricas sobre os mesmos.

▪ Teorema de Bernoulli

O teorema de Bernoulli pode ser explicado através da interpretação da figura seguinte, na medida em que a velocidade é alta onde a pressão é baixa e vice-versa. Este teorema demonstra que, em qualquer ponto de um sistema fechado, a soma da energia potencial, cinética, pressão e fricção de um fluido é igual a uma constante.

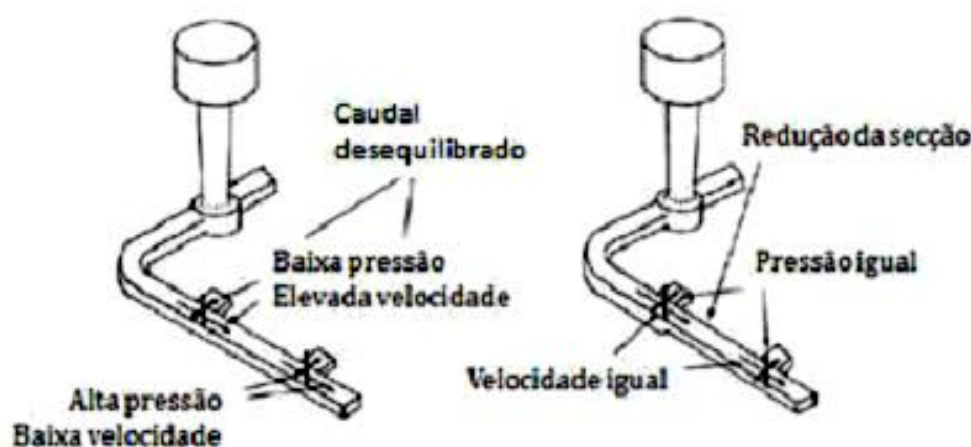


Figura 2. Adaptação do teorema de Bernoulli ao sistema de enchimento [4].

Analisando com cuidado a figura 2, é possível afirmar que no segundo ataque a velocidade diminui porque o canal de distribuição não se alonga mais. A pressão no último ataque é superior relativamente à do primeiro, aumentando desta forma o caudal no último canal. Reduzindo a área de distribuição, igualam-se as velocidades e as pressões nos dois ataques [4].

▪ Lei da continuidade para um sistema fechado

A lei da continuidade afirma que para um sistema fechado de um líquido incompressível e que possua paredes impermeáveis, o caudal deste mesmo sistema será o mesmo em todos os pontos que o constitui [4].

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad [1]$$

Onde:

Q - caudal (m³/s);

A - área de secção recta ocupada pelo fluido (m²);

V - velocidade do fluido (m/s)

Na prática esta lei pode ser verificada interpretando a figura 3, onde a velocidade do fluido aumenta na queda, o que significa que a área da secção recta diminui. Este é o motivo pelo qual o gito de descida é, por norma, cónico [4].

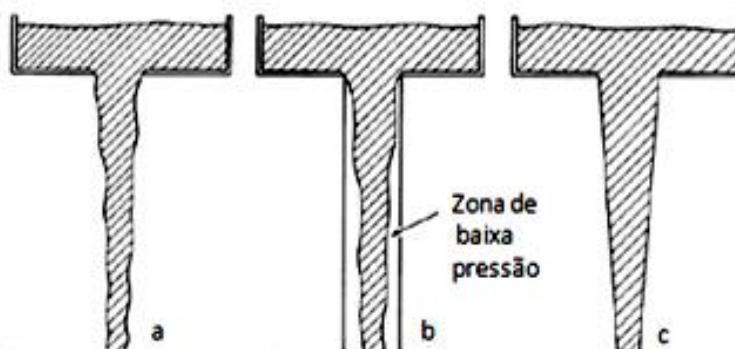


Figura 3. Perfil do fluxo metálico: a) em queda livre; b) dentro de um gito de paredes paralelas; c) dentro de um gito cónico [4].

No caso do gito de paredes paralelas é criada uma zona de baixa pressão gerada pela passagem do metal a alta velocidade e que irá promover à aspiração do ar da moldação. Já no caso do gito cónico este acompanhará o fluxo que se mantém sempre em contacto com as paredes do gito, minimizando desta maneira a aspiração de ar da moldação e a turbulência da superfície [4].

▪ Efeitos de momento

A lei da inércia (1ª lei de Newton) enuncia que um fluido em movimento em linha recta, permanece desta forma à mesma velocidade até que uma força externa o obrigue a mudar essa velocidade ou direcção. Este efeito é de grande importância a nível das áreas das secções do canal de alimentação dado que, quando esta área aumenta ou a direcção dos canais varia bruscamente, o metal afasta-se das paredes promovendo a aspiração de ar da moldação. A figura 4 ilustra esse mesmo facto onde se conclui que, para diminuir a aspiração de ar, o canal não deverá ter um ângulo recto mas sim uma curva pouco pronunciada [4].



Figura 4. Efeito do momento no perfil do fluxo no interior dos canais [4].

2.1.3. Características do fluxo

O movimento do fluido pode ser caracterizado pelo número de Reynolds:

$$N_R = \frac{vd\rho}{\mu} \quad [2]$$

Onde:

N_R - número de Reynolds;

v - velocidade do líquido (m/s);

d - diâmetro do canal de líquido (m);

ρ - peso específico do líquido (m);

μ - viscosidade (Pa).

Para que o fluxo seja laminar, o número de Reynolds deverá manter-se inferior a 2000. No caso de este ser superior a 20000 o fluxo será turbulento. Se o valor deste número se mantiver entre estes dois valores, 2000 e 20000, o regime é misto e verifica-se uma turbulência no interior do metal, mas à superfície mantém-se uma camada que apresenta fluxo laminar. Esta é a situação aceitável dado que impedirá que óxidos e impurezas superficiais contaminem o metal. Esta situação é esquematizada na figura 5 [4].

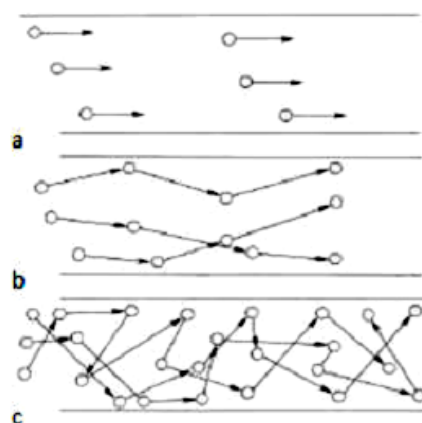


Figura 5. Características do fluxo: a)laminar; b)misto; c)turbulento [4].

2.1.4. Velocidade crítica de enchimento

Ao efectuar o vazamento, deve-se ter em conta que existe uma velocidade óptima à qual o metal deverá entrar na cavidade de moldação. Esta velocidade tem o objectivo principal de permitir que a frente do metal avance somente a distância cuja tensão superficial possa preservar a integridade da superfície. Para metais e ligas densas como o caso do aço, a bibliografia recomenda que essa velocidade seja inferior a 40 cm/s [5].

A gota de metal líquido encontra-se em equilíbrio desde que se mova a uma velocidade máxima próxima da velocidade crítica. Assim, a tensão superficial mantém a forma compacta opondo-se à pressão que iria fazer com que o metal se espalhasse por acção da gravidade [5].

Se a velocidade de enchimento ultrapassar a velocidade crítica, a altura de uma perturbação presente na superfície do banho excederá a altura da gota séssil, fazendo com que o líquido deixe de ser suportado pela tensão superficial. Devido à acção da gravidade, essa perturbação da superfície irá colapsar e penetrar no interior do metal líquido. A formação dessa perturbação está representada na figura 6 [5].

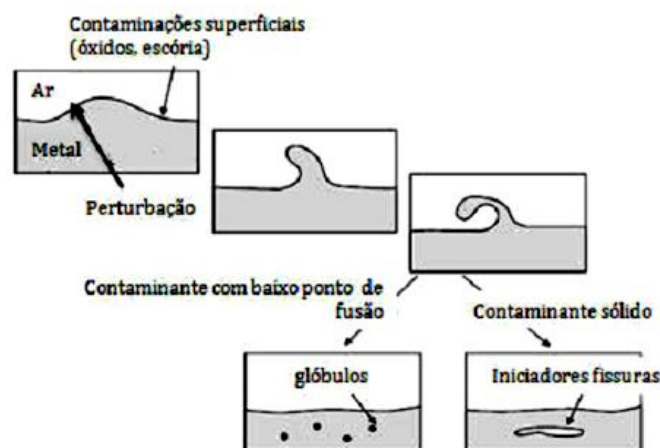


Figura 6. Turbulência superficial em metais líquidos [5].

Caso a gota exceda a velocidade crítica, a energia cinética da mesma será suficiente para arrastar consigo contaminações superficiais e internas que irão constituir defeitos como inclusões. Situação pior será aquela em que um filme de óxido se dobra sobre si próprio dando origem a uma pequena fissura [5].

2.2. ProCast

A nível introdutório e informativo pode-se salientar que o ProCast foi desenvolvido pela ESI Group e foi pensado para responder às necessidades da indústria da fundição [5].

É um software baseado no método de elementos finitos (FEM) e usando opções específicas, o ProCast tenta cobrir diversos processos de fundição onde se incluem:

- Fundição injectada de alta e baixa pressão;
- Fundição por precisão, fundição em coquilha;
- Fundição em areia, fundição por gravidade;
- Fundição por cera perdida, fundição centrífuga [6].

O ProCast permite efectuar simulações de enchimento e solidificação tendo em conta os coeficientes de transferência de calor, incluindo radiação, fluxo do banho metálico e o enchimento da moldação. Tem também em conta as tensões exercidas pelo material de moldação no fundido.

O esquema apresentado de seguida representa de um modo muito simplificado o caminho que será necessário seguir para visualizar uma simulação obtida em ProCast, tendo como ponto de partida o modelo CAD.

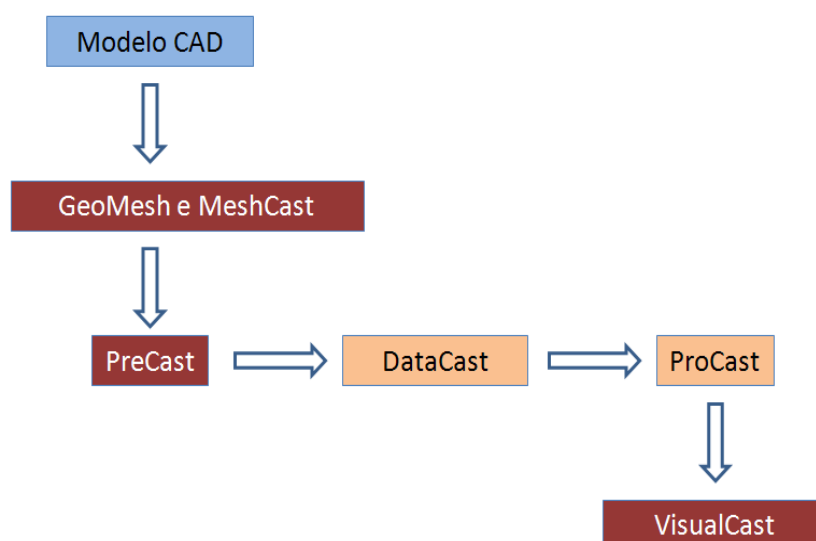


Figura 7. Esquema dos passos a seguir para realizar de uma simulação obtida em ProCast.

Para melhor interpretação da figura convém salientar que:

- GEOMESH - é um importador de ficheiros CAD (do tipo STL, IGS, STEP, entre outros). É uma ferramenta de importância vital no desenvolvimento de um projecto em ProCast, na medida em que irá tratar a superfície do modelo CAD, preparando-a para ser processada em MeshCast [7];
- MeshCast - consiste no módulo de malhamento que irá criar uma malha superficial e, de seguida, uma malha volumétrica (tetraédrica);
- PreCast - este é o pré-processador onde se definem os materiais, propriedades e parâmetros de simulação;
- DataCast/ProCast - são os módulos de compilação e análise de processos necessários para a simulação;
- Visual-Cast - é o visualizador de resultados;

2.2.1. Propriedades do material em estudo

Uma vez que o objectivo deste trabalho seria criar um sistema de alimentação e gitagem de uma peça em aço inoxidável austenítico do tipo A297-HF, segundo a norma ASTM, será apresentada alguma informação das propriedades físicas e químicas desta liga que foram utilizadas para introduzir na base de dados do ProCast:

Tabela I. Algumas propriedades físicas da liga A297-HF utilizadas para criação de uma entrada na base de dados no ProCast.

Massa Volúmica (g/cm ³)	7,75	
Ponto de fusão (°C)	1398	
Condutividade Térmica a 100°C (J m ⁻¹ s ⁻¹ °C ⁻¹)	8,3	
Expansão térmica (mm/°C)	16,38	21°C a 538°C
	18,18	21°C a 649°C
	18,9	21°C a 871°C

Tabela II. Composição química da liga A297-HF utilizada para criação de uma entrada na base de dados no ProCast.

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S
% Min.	-	0.5	0.35	18	8	-	-	-
%Máx.	0.40	1.5	2.0	23	12	0.5	0.04	0.04

As percentagens dos elementos de liga que constituem este aço, bem como determinadas propriedades, foram então introduzidas no campo de base de dados do ProCast como é possível verificar na figura 8.

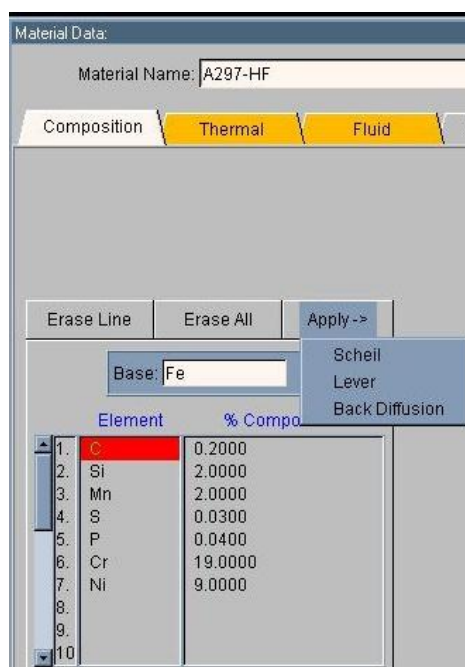


Figura 8. Introdução da liga a estudar e aplicação do modelo térmico requerido.

A figura 8 apresenta a composição química da liga utilizada neste trabalho, bem como os modelos térmicos possíveis de serem escolhidos para cálculo das propriedades térmicas, efectuadas pelo próprio software. Esses modelos térmicos seriam o de “Scheil”, o de “Lever” e o “Back diffusion” [7].

Os modelos “Scheil” e o de “Lever” correspondem a dois modelos diferentes de microsegregação. No caso do modelo “Lever” é aplicada a regra da alavanca, que corresponde a uma solubilidade total do soluto no sólido. Isto será o mesmo que dizer que existe uma muito boa difusão no sólido. Por outro lado, o modelo “Scheil” é aplicado no caso de não existir difusão na fase sólida. Ambos os modelos consideram uma solubilidade total ou difusão infinita no líquido [7].

O modelo “Back diffusion” é o modelo intermédio dos que foram apresentados anteriormente. Este modelo permite alguma difusão no sólido. Quando é usado, deve ser especificada uma taxa de arrefecimento média, correspondente a uma taxa de arrefecimento representativa do fundido a ser modelado de maneira a que seja possível determinar a quantidade de difusão retardada [7].

Para ligas com difusão limitada no estado sólido será utilizado o modelo “Back diffusion”. Nestes casos e segundo o apoio técnico da ESIGROUP, convém usar uma taxa de arrefecimento de 10 K/s.

No que diz respeito às propriedades térmicas, o ProCast apresenta os valores que ele próprio calcula, segundo o método escolhido anteriormente (Scheill, Lever ou Back Diffusion). A figura 9 apresenta algumas dessas propriedades, sendo que o gráfico apresentado se refere à condutividade térmica da liga.

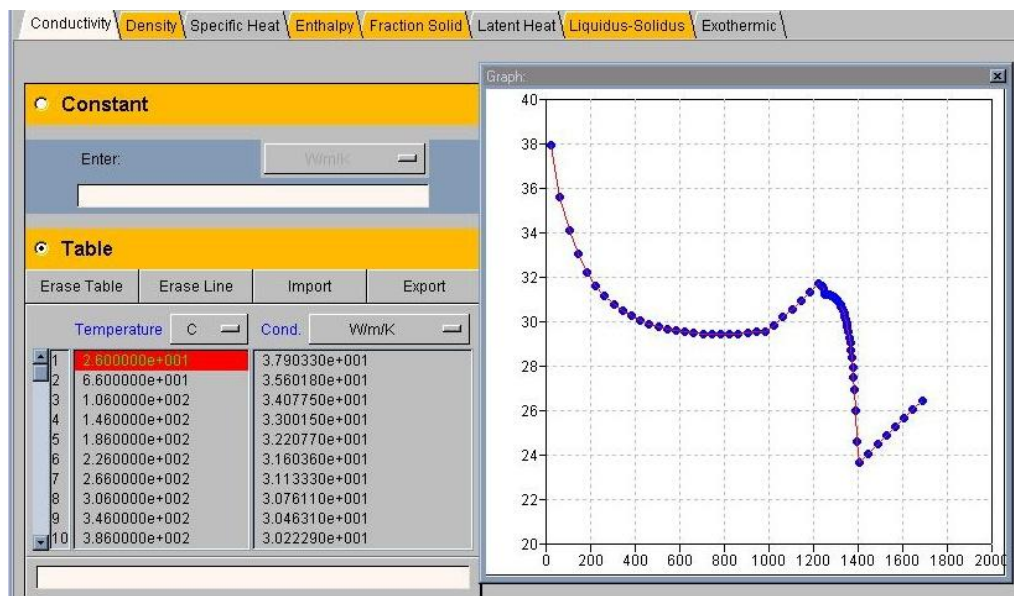


Figura 9. Propriedades térmicas da liga obtidas após o modelo térmico escolhido.

3. Metodologia Experimental

3.1. Equipamento utilizado

Para a realização das simulações de enchimento e solidificação apresentadas ao longo deste trabalho, foi utilizado como ponto de partida o software SOLIDCast 7.2.2. Após adquiridas as competências necessárias para utilizar o ProCast, este foi então utilizado na versão 2008 que viria a ser actualizada para a versão 2009.

As simulações foram realizadas num computador do tipo PC (*Personal Computer*) com a seguinte configuração:

- Processador Intel Core 2 Quad a 2.8 Ghz;
- 8Gigabytes de memoria RAM DDR2;
- Disco S-ATA 500 GB;
- Motherboard Asus P5E3 Deluxe;
- Placa Gráfica NVIDIA Quadro FX.

3.2. Início do projecto

A figura 10 esquematiza a metodologia deste trabalho:

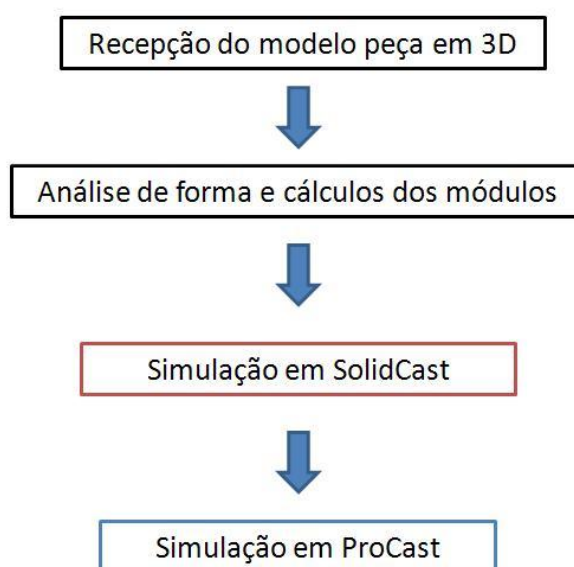


Figura 10. Esquematização do seguimento dado no trabalho.

Como se pode verificar pela análise da figura 10, o trabalho começou a partir do momento em que foi recepcionada a peça já modelada, no formato CAD. De seguida, foi efectuada a sua análise de forma e consequentes cálculos dos módulos da peça e alimentadores, apresentados em anexo nas tabelas XXI e XXII.

Relativamente à parte da simulação, esta começou por ser feita em SolidCast, uma vez que seria um bom ponto de partida devido ao facto de já ter sido utilizado noutras disciplinas do Mestrado Integrado, passando-se de seguida para o ProCast.

Este espaço temporal entre a utilização dos dois softwares permitiu que se obtivesse alguma experiência de aprendizagem com o ProCast, sendo este utilizado em exclusividade a partir de certa altura do trabalho.

3.3. Análise da peça em estudo

A peça em estudo seria elaborada na liga A297-HF, segundo a norma ASTM, e teria um peso de 35kg.

Após recepcionar a modelação 3D da peça em estudo em formato CAD, começou-se por se efectuar a sua análise de forma com o intuito de identificar as zonas críticas da peça bem como obter o valor dos módulos dos alimentadores. Todos estes cálculos encontram-se detalhados em anexo.

Depois de ter sido efectuada a análise de forma e todos os cálculos a ela inerentes, confirmaram-se os valores obtidos utilizando o software SolidCast. Como é possível verificar pela análise da figura 11, as zonas críticas apresentam-se nos locais identificados pelos cálculos teóricos, sendo estas as zonas que deverão receber maior atenção a nível de alimentação.

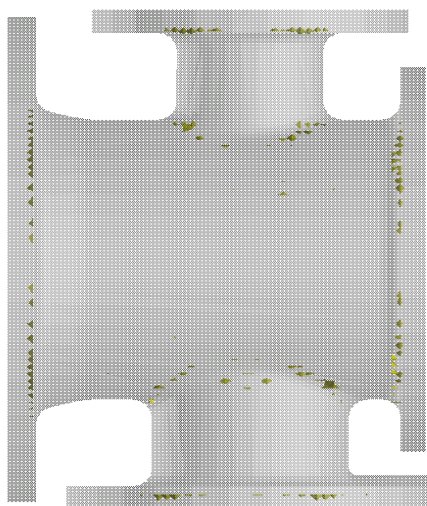


Figura 11. Localização dos pontos quentes da peça obtidos no SolidCast, utilizando a função “hot spot” com valor igual a 1,2.

No que diz respeito ao cálculo do volume dos alimentadores foi efectuando tendo em conta duas situações:

- i) a primeira, sem o uso de camisas exotérmicas
- ii) a segunda, com o uso de camisas exotérmicas.

Devido ao facto de no caso i) o diâmetro dos alimentadores necessários ser bastante superior aos obtidos no caso ii), levou a que a empresa optasse por motivos de economia de material, pelo segundo caso ou seja, alimentadores com camisas exotérmicas.

A figura 12 localiza as diferentes secções da peça.

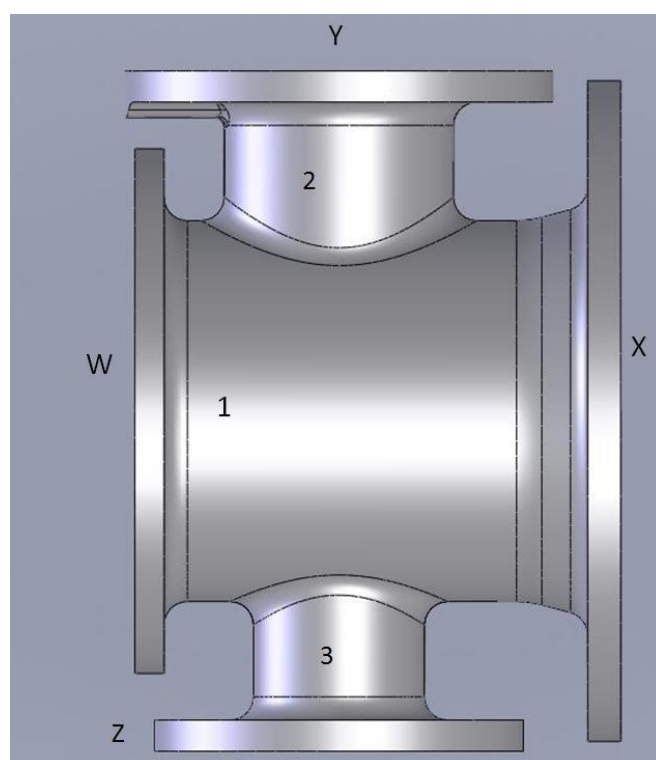


Figura 12. Identificação das secções da peça em estudo.

Tabela III. Valores referentes ao cálculo do volume dos alimentadores respeitando a situação i).

Cálculo Sem Camisas Exotérmicas		
V peça = 4170 cm ³	V. alimentador= 333,6 cm ³	Rendimento $\mu=33\%$
Diâmetro alimentador = 73 mm		Contracção volúmica específica B=8%

A tabela III apresenta os dados necessários para o cálculo do volume dos alimentadores, tendo em conta o volume da peça e o rendimento dos alimentadores, sem o uso de camisas exotérmicas.

Através da obtenção do volume dos alimentadores a usar e sabendo que, à partida, estes iriam ser alimentadores laterais devido ao facto das secções serem demasiadamente finas para que a colocação de alimentadores de topo fossem possíveis, calculou-se o número de alimentadores necessários para cada zona da peça.

Tabela IV. Número de alimentadores necessários para alimentar as diferentes secções da peça em estudo.

Secção	Nº Alimentadores
W	2
Y	3
Z	3
X	4

A tabela IV apresenta o número de alimentadores necessários para alimentar cada secção. Este número foi calculado tendo em conta o volume do alimentador e o volume da peça que iria alimentar.

A tabela V apresenta os dados necessários para o cálculo do volume dos alimentadores tendo em conta o volume da peça e o rendimento dos alimentadores, desta vez usando camisas exotérmicas o que levaria a que estes tivessem um rendimento de 66%. Este facto levou a que o diâmetro destes alimentadores fosse menor que os alimentadores sem camisas exotérmicas.

Tabela V. Valores referentes ao cálculo do volume dos alimentadores respeitando a situação ii).

Cálculo Com Camisas Exotérmicas		
V peça = 4170 cm ³	Diâmetro alimentador = 55 mm	Rendimento $\mu=66\%$
Volume alimentador = 143,8 cm ³		Contracção volúmica específica B=8%

A tabela VI apresenta o número de alimentadores necessários para alimentar cada secção sem a utilização de camisas exotérmicas.

Tabela VI. Número de alimentadores necessários para alimentar as diferentes secções da peça em estudo.

Secção	Nº Alimentadores
W	3
Y	3
Z	3
X	4

3.4. Informações necessárias para as simulações

Antes de se efectuarem quaisquer simulações houve a necessidade de se saber quais as dimensões da caixa de moldação, bem como outras informações necessárias, tais são os casos da temperatura de vazamento, tempo de vazamento, entre outras.

Deste modo a tabela VII apresenta as dimensões da caixa de moldação a ser utilizada.

Tabela VII. Dimensões da caixa de moldação utilizada.

Dimensões Caixa Moldação	
L	690 mm
H	250 + 250 mm
E	590mm

O tipo de areia empregue na moldação foi auto-secativa.

Por opção da empresa, o tempo de vazamento a utilizar deveria rondar os 20 segundos e a temperatura de vazamento a usar seria de 1510°C.

4. Apresentação e Discussão de Resultados

Neste ponto do trabalho serão apresentados os resultados obtidos nas simulações efectuadas bem como os parâmetros mais importantes utilizados. Serão também comentados certos aspectos considerados importantes e será feita uma comparação entre eles. A nível de resultados serão divididos em duas partes: a I e a II e nelas estão contidas as várias hipóteses simuladas.

A parte I refere-se às simulações efectuadas no modelo inicial da peça em estudo, antes de uma alteração da geometria e a parte II refere-se às simulações efectuadas após alteração da geometria. Na parte I estão contidas simulações efectuadas em SolidCast e em ProCast. O SolidCast foi utilizado apenas para iniciar o projecto uma vez que na altura em que esta tese foi iniciada ainda não havia conhecimento suficiente para aplicar directamente o ProCast. A parte II como temporariamente se iniciou depois da parte I, foi usado apenas o ProCast.

As figuras 13 e 14 referem-se à geometria da peça (com saídas de auto-alimentação) em corte para que seja possível observar as alterações efectuadas.

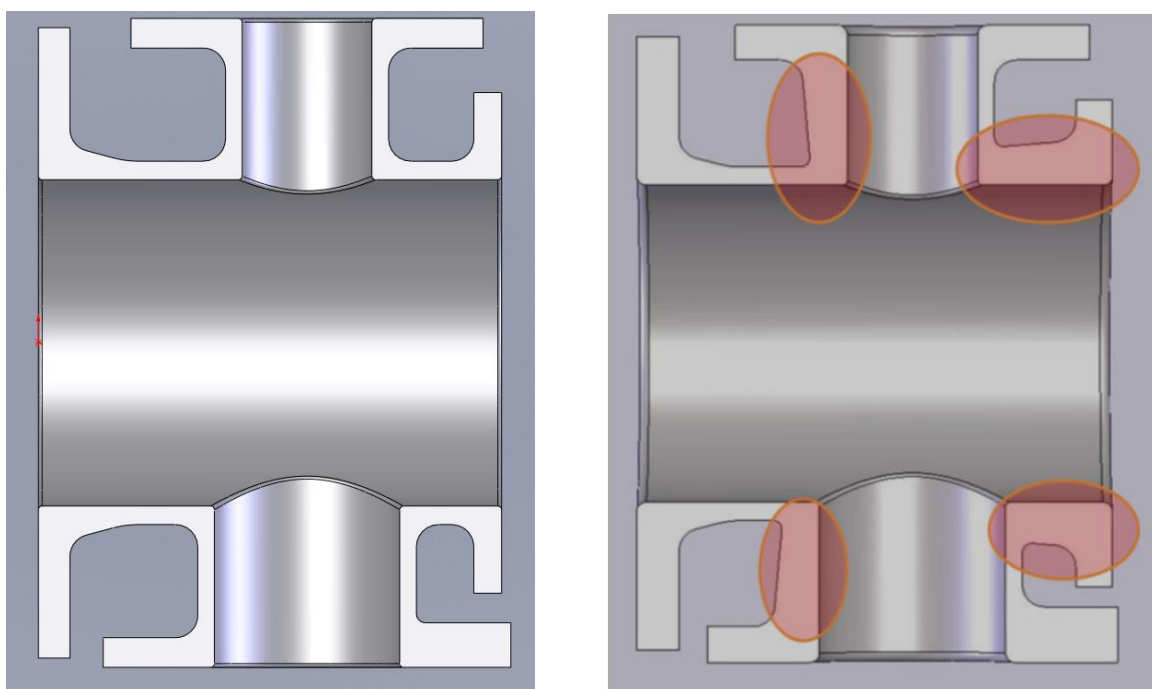


Figura 13 e 14. Vista da peça, em corte, onde estão salientadas as zonas alteradas.

As tabelas VIII e IX resumem as partes I e II dos resultados, que serão abordados em detalhe de seguida.

Tabela VIII. Resumo do conteúdo da parte I.

Parte I			
Hipótese 1	<ul style="list-style-type: none"> - Simulação em ProCast - Canal de distribuição recto - 10 Alimentadores - HTC metal / areia - 500 W/m².K - HTC camisas / areia 50 W/m².K - Malha: 6 mm 	Hipótese 2	<ul style="list-style-type: none"> - Simulação em SolidCast - Canal de distribuição modificado - 11 Alimentadores - HTC metal/areia - 500 W/m².K - HTC camisas /areia 50 W/m².K - Malha: 6 mm
Hipótese 3	<ul style="list-style-type: none"> - Simulação em ProCast - Canal de distribuição curvo - 11 Alimentadores - HTC metal/areia - 500 W/m².K - HTC camisas /areia 50 W/m².K - Malha: 3 mm 	Hipótese 4	<ul style="list-style-type: none"> - Simulação em ProCast e SolidCast - Canal de distribuição curvo - 11 Alimentadores - HTC metal/areia - 500 W/m².K - HTC camisas /areia 50 W/m².K - Malha: 3 mm
Hipótese 5	<ul style="list-style-type: none"> - Simulação em ProCast - Canal de distribuição curvo - 11 Alimentadores - HTC metal/areia - 750 W/m².K - HTC camisas /areia 100 W/m².K - Malha: 4 mm 	Hipótese 6	<ul style="list-style-type: none"> - Simulação em ProCast - Canal de distribuição curvo - 11 Alimentadores - HTC metal/areia - 750 W/m².K - HTC camisas /areia 100 W/m².K - Malha: 3 mm
Hipótese 7	<ul style="list-style-type: none"> - Simulação em ProCast - Canal de distribuição curvo - 11 Alimentadores - HTC metal/areia - 1000 W/m².K - HTC camisas /areia 100 W/m².K - Malha: 3 mm - Atribuição de valor do “inlet” e “heat” 		

HTC - *heat transfer coefficient*

Tabela IX. Resumo do conteúdo da parte II.

Parte II			
Hipótese 8	<ul style="list-style-type: none"> - Simulação em ProCast - Canal de distribuição curvo - 11 Alimentadores - HTC metal/camisas - 500 W/m².K - HTC metal/areia - 500 W/m².K - HTC camisas /areia - 100 W/m².K - HTC areia / filtro -100 W/m².K - HTC filtro / metal - 20 W/m².K - HTC machos / metal - 500 W/m².K - Malha: 3 mm 	Hipótese 9	<ul style="list-style-type: none"> - Simulação em ProCast - Canal de distribuição curvo - 11 Alimentadores - HTC metal/camisas - 750 W/m².K - HTC metal/areia - 750 W/m².K - HTC camisas /areia - 100 W/m².K - HTC areia / filtro -100 W/m².K - HTC filtro / metal - 20 W/m².K - HTC machos / metal - 750 W/m².K - Malha: 3 mm
Hipótese 10	<ul style="list-style-type: none"> - Simulação em ProCast - Canal de distribuição curvo - 11 Alimentadores - HTC metal/camisas - 1000 W/m².K - HTC metal/areia - 1000 W/m².K - HTC camisas /areia - 350 W/m².K - HTC areia / filtro - 350 W/m².K - HTC filtro / metal - 0 W/m².K - HTC machos/metal - 1000 W/m².K - Malha: 3 mm 	Hipótese 11	<ul style="list-style-type: none"> - Simulação em ProCast - Canal de distribuição curvo - 11 Alimentadores - HTC metal/camisas - 500 W/m².K - HTC metal/areia - 500 W/m².K - HTC camisas /areia - 350 W/m².K - HTC areia / filtro - 350 W/m².K - HTC filtro / metal - 0 W/m².K - HTC machos / metal - 500 W/m².K - Malha: 3 mm
Hipótese 12	<ul style="list-style-type: none"> - Simulação em ProCast - Canal de distribuição curvo - 11 alimentadores - HTC metal/camisas - 750 W/m².K - HTC metal/areia - 750 W/m².K - HTC camisas /areia - 200 W/m².K - HTC areia / filtro - 200 W/m².K - HTC filtro / metal - 0 W/m².K - HTC machos / metal - 750 W/m².K - Malha: 3mm 		

Serão agora apresentados em detalhe as várias hipóteses estudadas para as partes I e II.

Os valores dos coeficientes de transferência de calor (HTC) tabelados fazem parte da gama de valores sugeridos pela ESIGROUP para este tipo de simulação e foram variados sempre dentro dessa gama.

4.1. Parte I

Hipótese 1

O modelo apresentado nesta hipótese 1 refere-se a um modelo cujo canal de distribuição é recto com a secção igual à calculada anteriormente. Existem dois ataques a nível do plano de apartação e são utilizados 10 alimentadores com respectivas camisas exotérmicas.

Tabela X. Parâmetros de simulação para a hipótese 1.

Interface	Coeficiente de transferência de calor HTC ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
Metal/areia	500
Camisas exotérmicas/areia	50

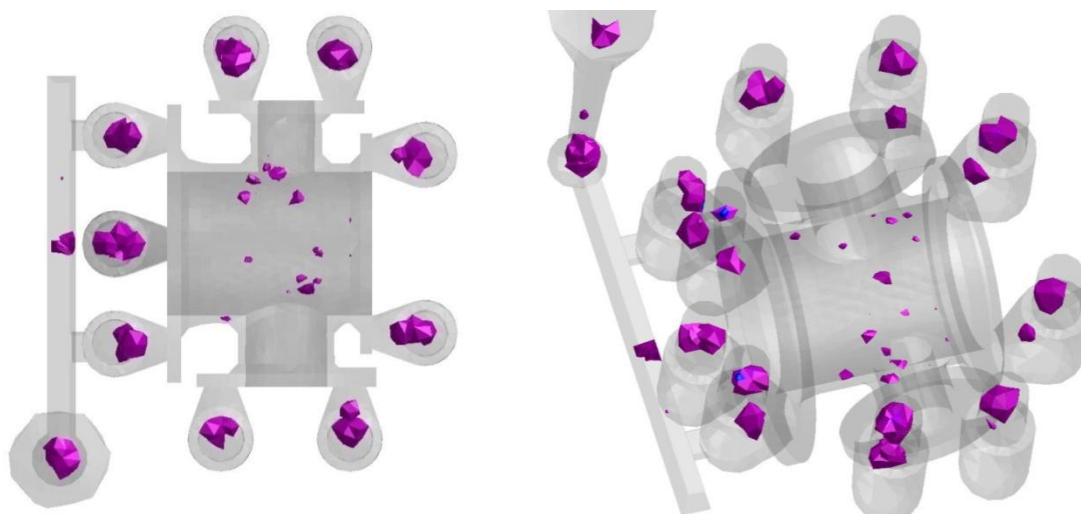


Figura 15 e 16. Análise da macroporosidade, apresentada em VisualCast

A hipótese 1 foi a primeira formulação de um modelo para simular usando o ProCast. Assim, foi possível constatar que além da malha demasiadamente grosseira, que facilmente é perceptível visualizando os rechupes que aparecem muito pouco detalhados. Isto significa que com um valor de malha destes, mesmo que o poro seja de pequenas dimensões, ele ocupará o tetraedro da malha correspondente. Daí o tamanho exagerado da porosidade apresentada.

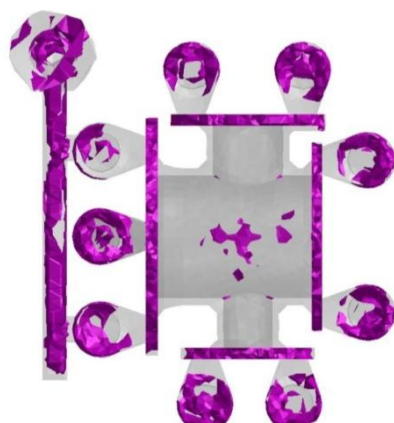


Figura 17. Análise da microporosidade, visualizada em VisualCast.

Analisando a figura 17, a microporosidade identificada, na realidade não irá aparecer dado que tem estas proporções devido à malha grosseira utilizada. Este pormenor viria a ser corrigido posteriormente.

O sistema de alimentação também não é o mais aconselhado dado que a peça deveria ser alimentada em três zonas para que fosse possível o seu enchimento em cerca de 20 segundos, sem que houvesse solidificação prematura em certas zonas finas da peça antes de ela encher completamente. Este foi um dos problemas visualizados no enchimento e que, possivelmente, iria originar distorções na peça, caso se validasse este modelo. Esta solidificação prematura foi verificada usando o VisualCast.

Hipótese 2

O próximo passo a dar para que haja uma evolução no sentido de melhorar certos aspectos de alimentação, será utilizar um canal de alimentação que permita alimentar a peça em três zonas, respeitando o tempo de enchimento da peça em 20 segundos.

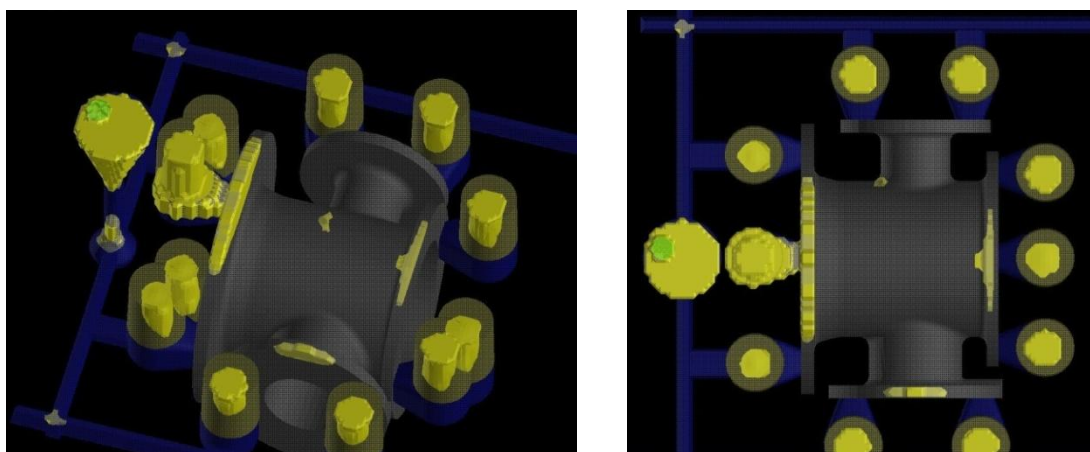


Figura 18 e 19. Análise de macroporosidade em SolidCast.

Para esta simulação foram usados 11 alimentadores sendo que, usando a função “material density” com o valor de 0,998 é fácil perceber que existem zonas com rechupe no topo da peça cujo alimentador simplesmente não enche devido ao facto do gito de descida estar demasiadamente curto e a altura metalostática não ser a suficiente para conseguir encher completamente o alimentador. Este pormenor viria a ser corrigido posteriormente. No SolidCast, o valor introduzido na função “material density” refere-se à percentagem de material contido numa determinada célula, neste caso 99,8%.

Os valores devem ser interpretados da seguinte forma:

Valor = 0	0% Metal	100% Porosidade
Valor = 0.90	90% Metal	10% Porosidade
Valor = 0.99	99% Metal	1% Porosidade

Hipótese 3

Nesta simulação utilizou-se já um canal de secção constante mas curvo. Segundo a teoria apresentada no início desta tese, para não haver uma velocidade excessiva nos cantos do canal de alimentação, este teria que ser redondo para que a velocidade fosse mais controlada e não houvesse tanta pressão do metal nas paredes do canal de distribuição. Esta pressão excessiva nas paredes do canal de distribuição pode levar ao arrastamento de areia e consequentemente, originar defeitos de vazamento.

Tabela XI. Parâmetros de simulação para a hipótese 3.

Interface	Coeficiente de transferência de calor HTC ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)
Metal/areia	500
Camisas exotérmicas/areia	50

As figuras 20 e 21, apresentadas de seguida, representam já os resultados obtidos numa simulação em que o modelo foi alterado de modo a que o canal de alimentação fosse curvo, atacando na mesma a peça em 3 zonas (por 6 alimentadores laterais).

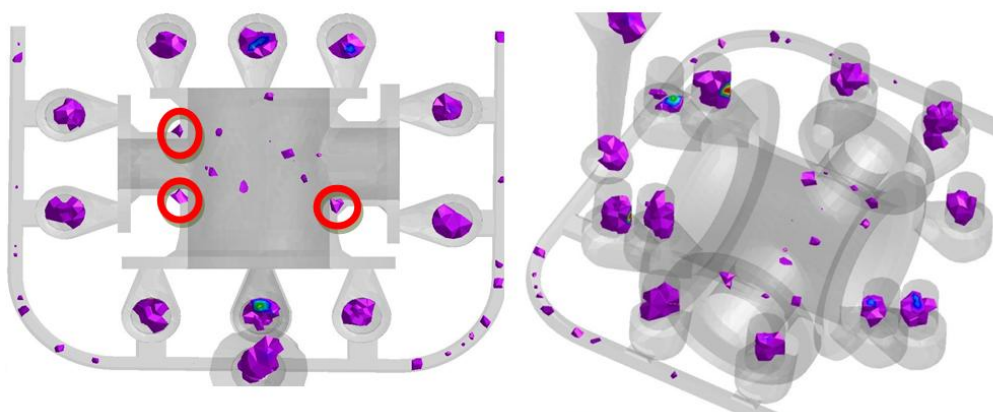


Figura 20 e 21. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.

Mais uma vez se verifica que a malha utilizada nesta simulação era ainda demasiadamente grosseira (malha de 6 mm). Deste modo, os resultados obtidos não deverão ser tidos em conta, devido a este pormenor. Contudo, continua-se a verificar a existência de rechupe nas zonas críticas da peça, assinaladas a vermelho.

Hipótese 4

Para tentar eliminar as macroporosidades existentes nos topos das zonas redondas da peça, incluíram-se mais dois alimentadores que serviriam para tentar colmatar a falha de alimentação existente nessa zona. Também se aumentou o volume da bacia de vazamento de um modo um pouco exagerado para verificar a influência desta juntamente com os alimentadores incluídos e os resultados foram bastante positivos.

Há que destacar que para o mesmo modelo simulado, no ProCast existe um maior detalhe na medida em que foi capaz de detectar rechupes em 3 zonas críticas desta peça, facto que o aproxima mais da realidade.

Tabela XII. Parâmetros de simulação para a hipótese 4.

Interface	Coeficiente de transferência de calor HTC (W/m ² .K)
Metal/areia	500
Camisas exotérmicas/areia	50
Malha utilizada: 3 mm	

O parâmetro “material density” para verificação da existência de porosidade no SolidCast tem o valor de 0,995.

No caso do ProCast utilizou-se o valor de 2% para visualização da macroporosidade. Este valor refere-se ao valor visualizado relativamente ao valor da malha, neste caso seriam 2% de uma malha de 3 mm).

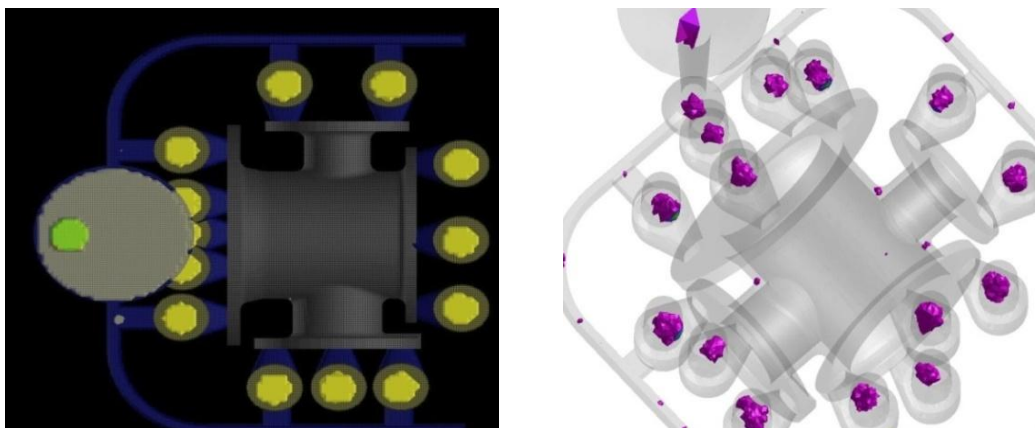


Figura 22 e 23. Análise da macroporosidade em SolidCast e ProCast, respectivamente.

Usando o mesmo modelo mas aumentando a sensibilidade de detecção de rechupes, utilizou-se como valor de “material density” - 0,998 - no caso do SolidCast e macroporosidade - 3% - no caso do ProCast. Os resultados são apresentados nas figuras 24 e 25.

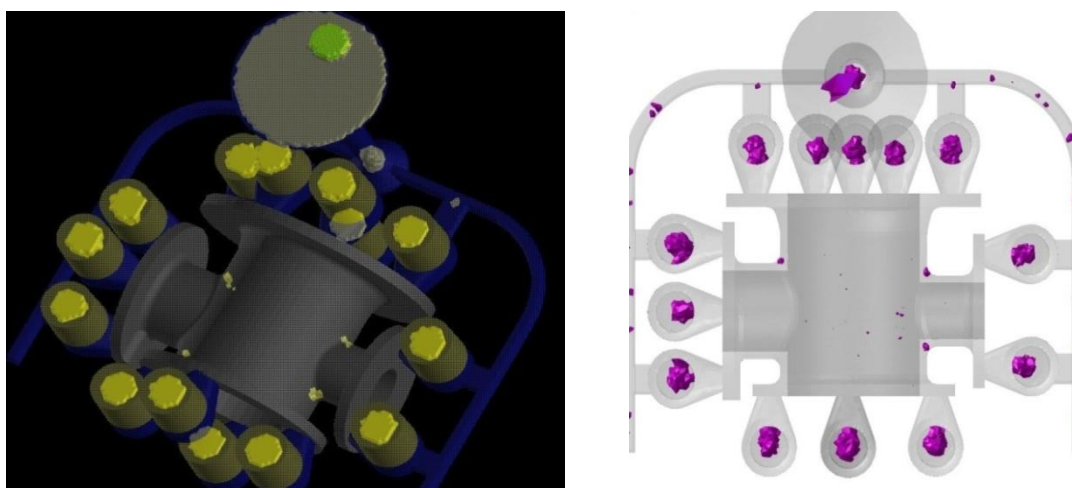


Figura 24 e 25. Análise da macroporosidade em SolidCast e ProCast, respectivamente.

Usando o valor material density = 0,998, o SolidCast consegue já detectar rechupe nas zonas críticas desta peça. No caso da figura 25, obtida no ProCast, o valor introduzido para visualizar a macroporosidade salienta, de modo um pouco exagerado a existência da mesma, como será possível verificar na validação experimental.

Hipótese 5

A hipótese 5 teve como mudança relativamente à hipótese 4, uma alteração a nível dos valores HTC (heat transfer coefficient) para as interfaces metal/areia e camisas/areia.

Foi utilizada uma malha de 4 mm que posteriormente se verificaria ser muito grosseira.

O gito de descida foi alterado porque tinha uma bacia de vazamento de dimensões muito elevadas, havendo um gasto de metal desnecessário.

Tabela XIII. Parâmetros de simulação para a hipótese 5.

Interface	Coefficiente de transferência de calor HTC ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)
Metal/areia	750
Camisas exotérmicas/areia	100
Malha utilizada: 4 mm	

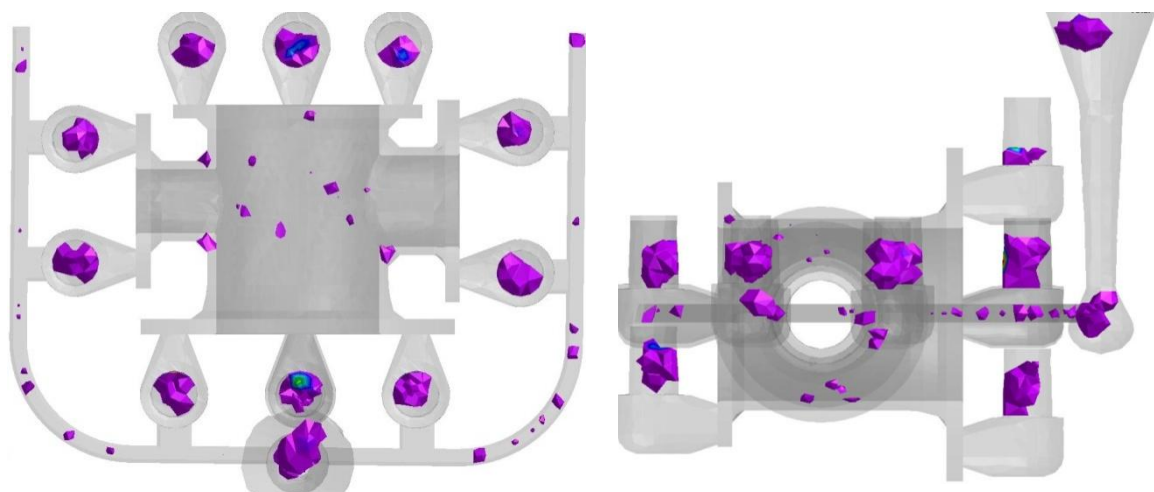


Figura 26 e 27. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.

Mesmo com as alterações a nível de coeficiente de transferência de calor, os resultados continuavam semelhantes aos da simulação anterior (hipótese 4).

Hipótese 6

Na hipótese 6 foram variados os valores HTC e o tamanho da malha.

Tabela XIV. Parâmetros de simulação para a hipótese 6.

Interface	Coefficiente de transferência de calor HTC ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
Metal/areia	750
Camisas exotérmicas/areia	100
Malha utilizada: 3 mm	

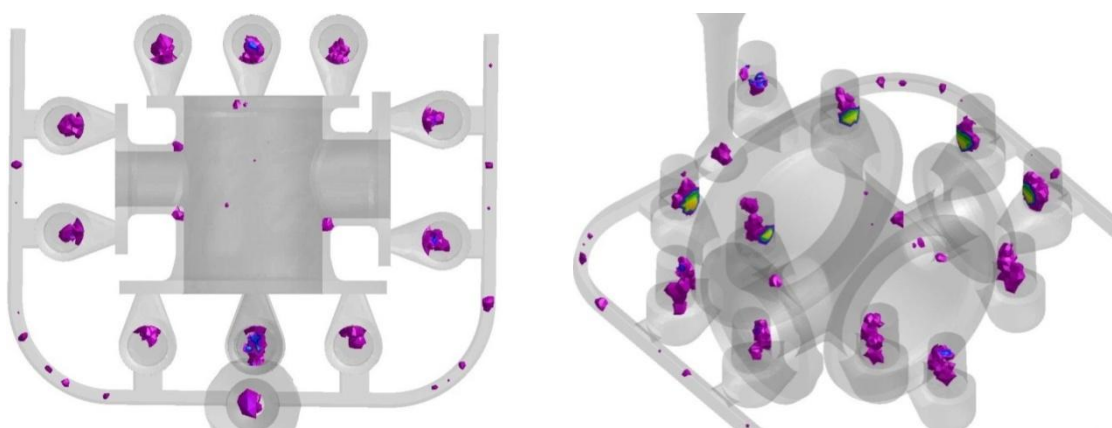


Figura 28 e 29. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.

As figuras 28 e 29 apresentam rechupes nas zonas críticas da peça bem como na zona cilíndrica superior. Este facto dever-se-á à incorrecta escolha dos coeficientes de transferência de calor para as diferentes interfaces.

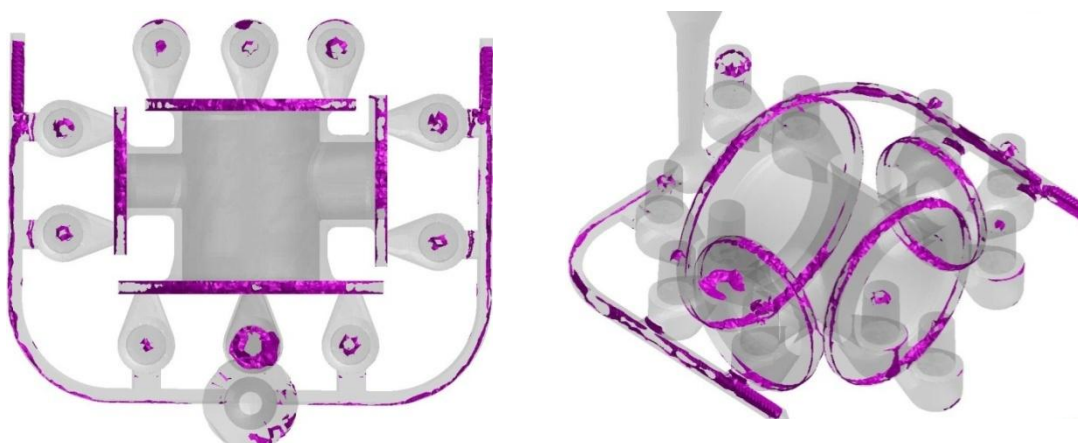


Figura 30 e 31. Análise da microporosidade, visualizada em VisualCast.

Em simulação, a microporosidade da peça iria concentrar-se nas zonas da flange, dado que são uma zona com baixa espessura e são também zonas onde existe um arrefecimento prematuro relativamente a outras zonas da peça.

Hipótese 7

Tabela XV. Parâmetros de simulação para a hipótese 7.

Interface	Coefficiente de transferência de calor HTC ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)
Metal/areia	1000
Camisas exotérmicas/areia	100
Malha utilizada: 3 mm	

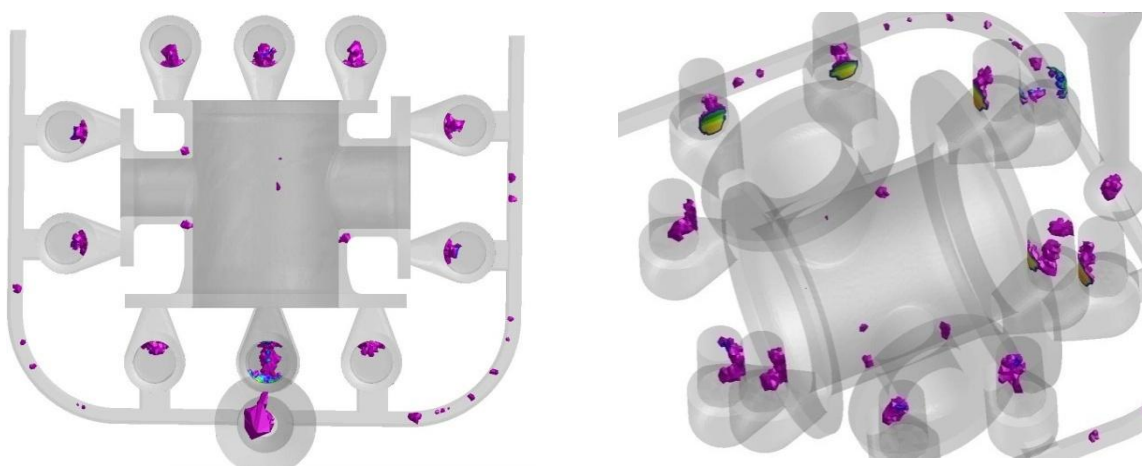


Figura 32 e 33. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.

Comparativamente com a hipótese 6, esta simulação mostra já algumas melhorias no que diz respeito à macroporosidade. Tal facto deve-se à aproximação dos valores de coeficiente de transferência de calor da realidade.

Esta simulação seria a que melhores resultados traria das que foram apresentadas até ao momento.

Foram atingidas determinadas etapas que seriam de importância vital para o desenvolvimento correcto de uma simulação posterior. Entre estas etapas constam:

- Tamanho correcto de malha da peça, HTC entre camisas exotérmicas e areia de moldação;
- Atribuição do valor do “inlet” e “heat”;

No ProCast, o “inlet” é uma zona virtual referente ao caudal do metal líquido proveniente da colher de vazamento, que é ajustado de maneira a que o vazamento seja

feito no tempo requerido, neste caso 20 segundos. Na prática, esta zona não existe já que na caixa de moldação existe um vazio por onde o metal entra, mas na simulação este mesmo espaço vazio é preenchido por tetraedros da malha.

Já o “heat” refere-se ao tipo de arrefecimento da moldação que, neste caso, é arrefecida ao ar.

Tinha-se também a percepção que a partir deste momento as simulações deveriam conter os machos em areia e o filtro de modo a verificar se iria haver alguma alteração significativa a nível de resultados.

A partir deste ponto pode-se considerar que se entrou na parte II relativa aos resultados das simulações.

4.2. Parte II

As simulações apresentadas de seguida já têm a alteração da geometria da peça de modo a que haja uma maior área de alimentação nas zonas críticas.

Foram introduzidos nos modelos a simular o filtro, os machos em areia auto-secativa de modo a aproximar a simulação, tanto quanto possível, da realidade.

O facto de o coeficiente de transferência de calor entre o banho metálico já dentro da cavidade de moldação e a areia de moldação não ser constante mas sim variável com a temperatura também já está tido em conta nestas simulações.

A variação do coeficiente de transferência de calor entre o filtro/areia e filtro/metal líquido, já está incluída nas simulações que irão ser apresentadas nesta parte II. Houve a necessidade de usar um valor HTC variável porque o metal líquido ao passar pelo filtro situado antes do poço, perdia cerca de 200°C. Como tal esta foi uma maneira de ultrapassar este problema encontrado.

As figuras 34 e 35 mostram o que se passava a nível de perda de temperatura do banho metálico a passar pelo filtro, facto que foi corrigido nesta parte II.

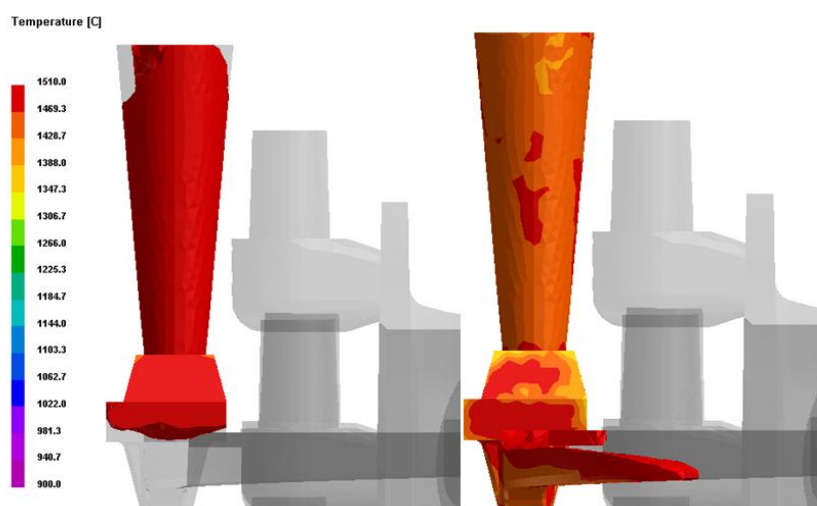


Figura 34 e 35. Perda de temperatura do banho metálico na passagem pelo filtro.

Como facilmente se verifica, existe uma perda de temperatura na ordem dos 200°C e que iria influenciar a viscosidade do banho metálico no enchimento da cavidade.

As figuras 36 e 37 apresentam o gráfico da variação da temperatura com o valor HTC da interface, bem como os valores utilizados.

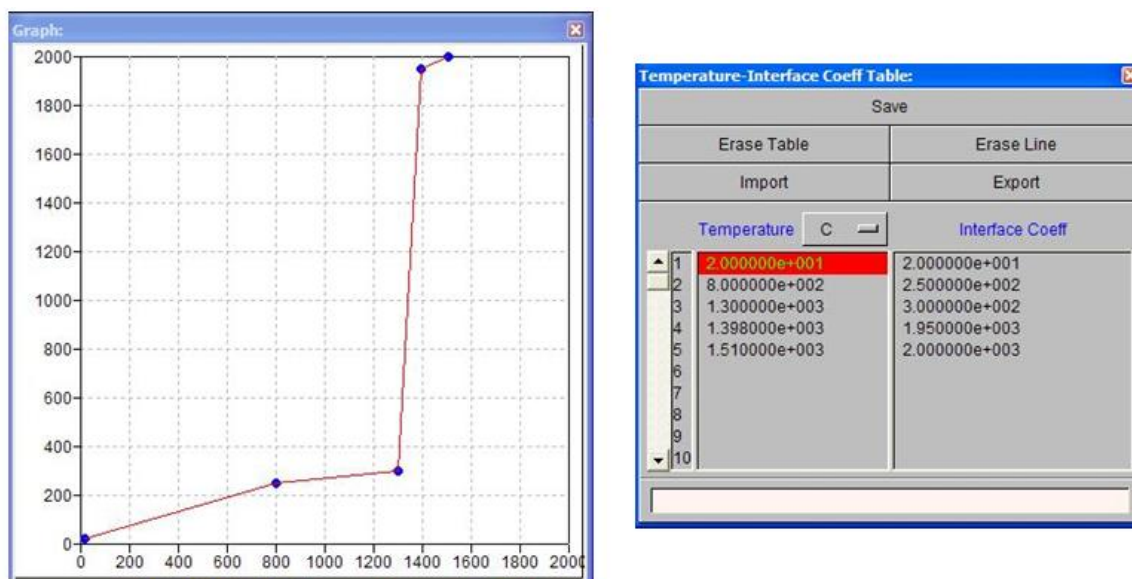


Figura 36 e 37. Gráfico da variação temperatura/HTC entre a areia de moldação e o fundido; Valores utilizados para criação da curva.

Já as figuras 38 e 39 apresentam o gráfico da variação do valor de HTC com o tempo para o filtro.

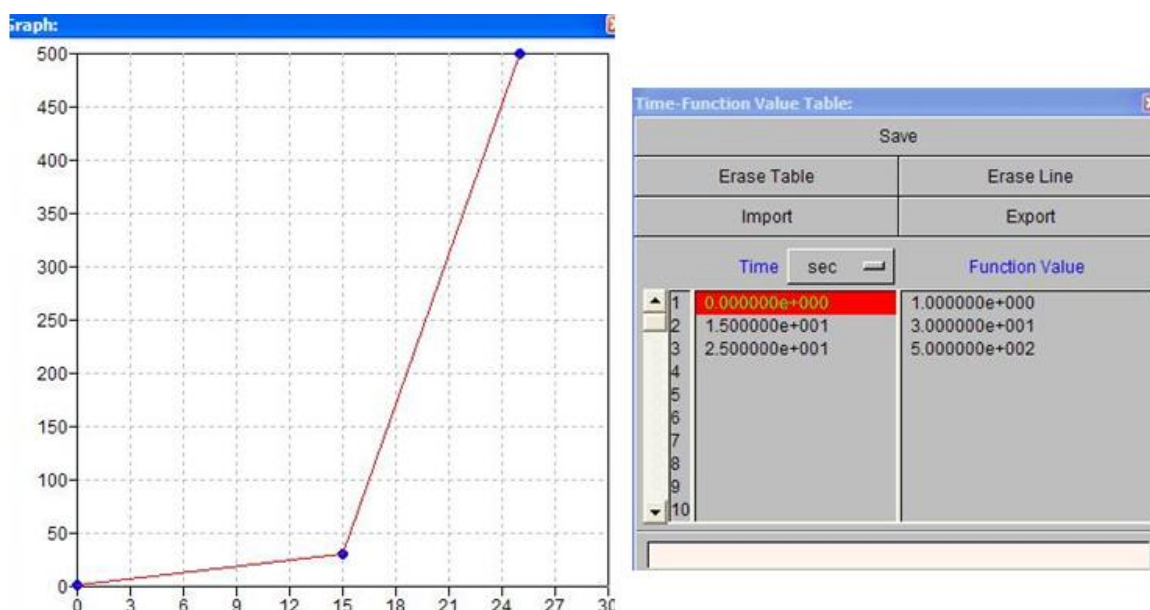


Figura 38 e 39. Gráfico da variação HTC/tempo para o filtro; Valores utilizados para criação da curva.

Hipótese 8

Tabela XVI. Parâmetros de simulação para a hipótese 8.

Nº alimentadores	Coeficientes transferência de calor nas interfaces (W/m ² .K)					
	Metal - camisa	Metal - areia	Camisa - areia	Areia - filtro	Filtro - Metal	Macho - peça
11	500	500	100	100	20	500

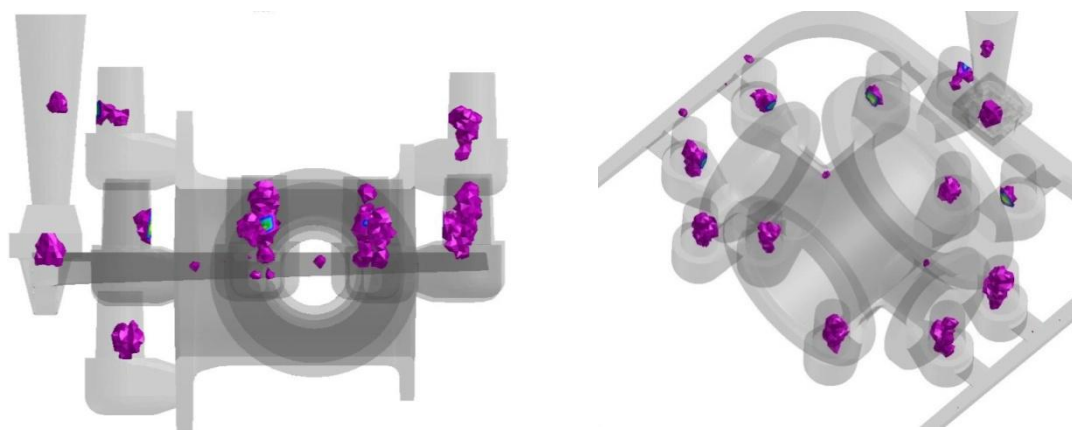


Figura 40 e 41. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.

Analisando as figuras 40 e 41 nota-se que os rechupes existentes na zona cilíndrica superior da peça deixaram de existir, permanecendo os rechupes nas zonas críticas da peça.

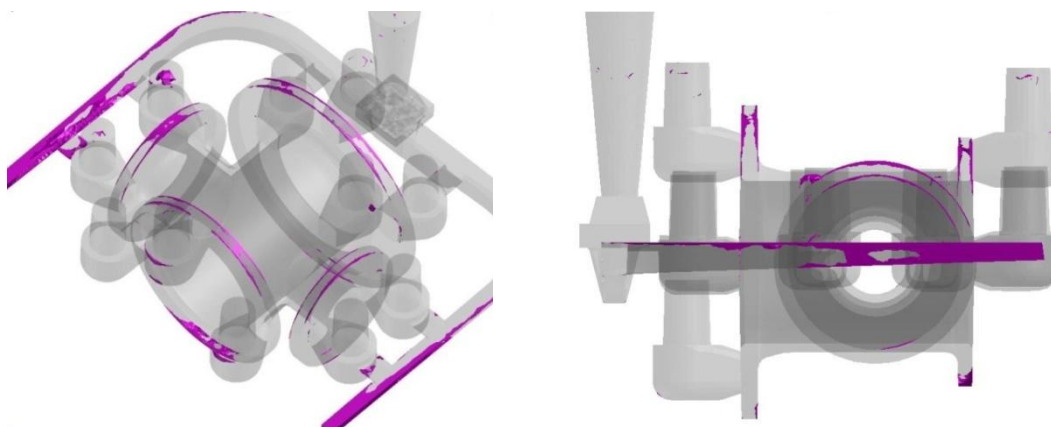


Figura 42 e 43. Análise da microporosidade, visualizada em VisualCast.

As figuras 42 e 43 mostram que a microporosidade, na peça, está localizada nos bordos das flanges.

Hipótese 9

Tabela XVII. Parâmetros de simulação para a hipótese 9.

Nº alimentadores	Coeficientes transferência de calor nas interfaces (W/m ² .K)					
	Metal - camisa	Metal - areia	Camisa - areia	Areia - filtro	Filtro - Metal	Macho-peça
11	750	750	100	100	20	750

No que diz respeito à velocidade do fluido nos ataques, será apresentada nas figuras 44 e 45 a informação respeitante ao que se passava na simulação.

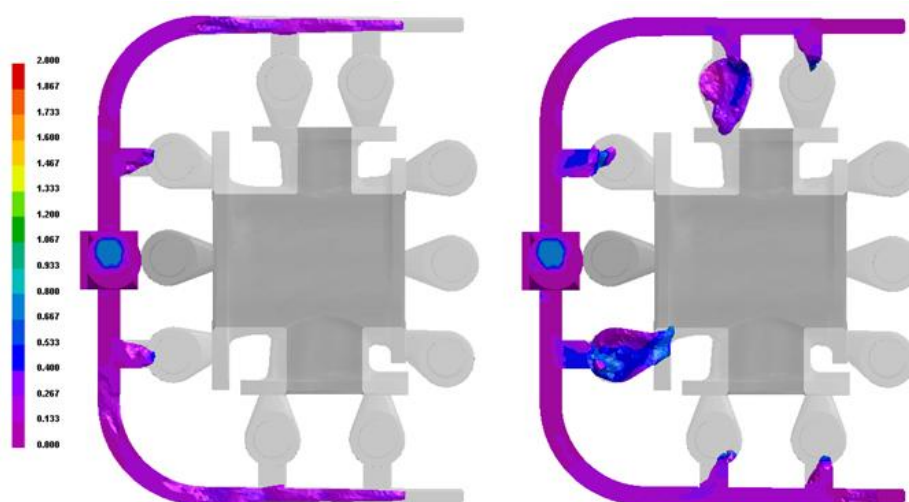


Figura 44 e 45. Velocidade do fluido nos ataques (m/s).

Pode-se verificar que inicialmente a velocidade começa bastante controlada e na ordem dos 0,2 m/s subindo um pouco para uma gama de velocidade na ordem dos 0,4 - 0,5 m/s. Este valor manteve-se no resto do enchimento da cavidade.

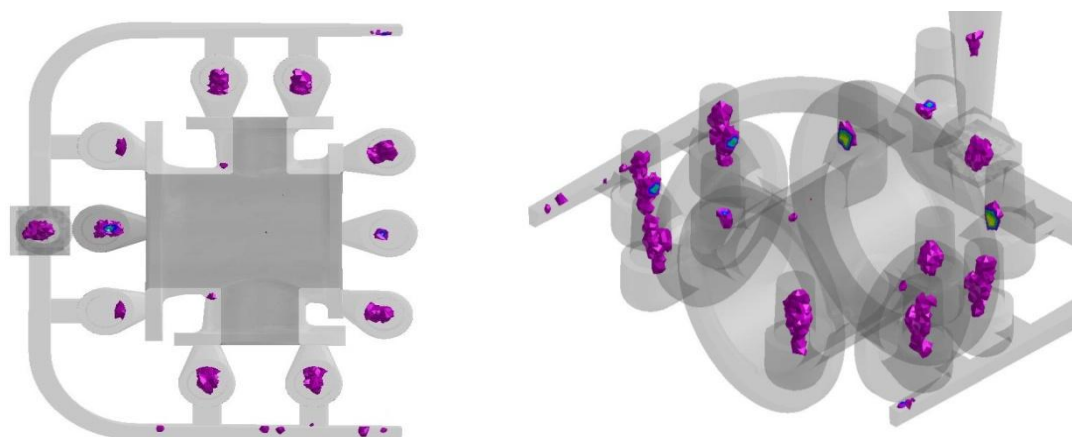


Figura 46 e 47. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.

As figuras 46 e 47 apresentam macroporosidades em duas zonas críticas da peça, causadas por falta de alimentação nos locais onde a geometria foi alterada.

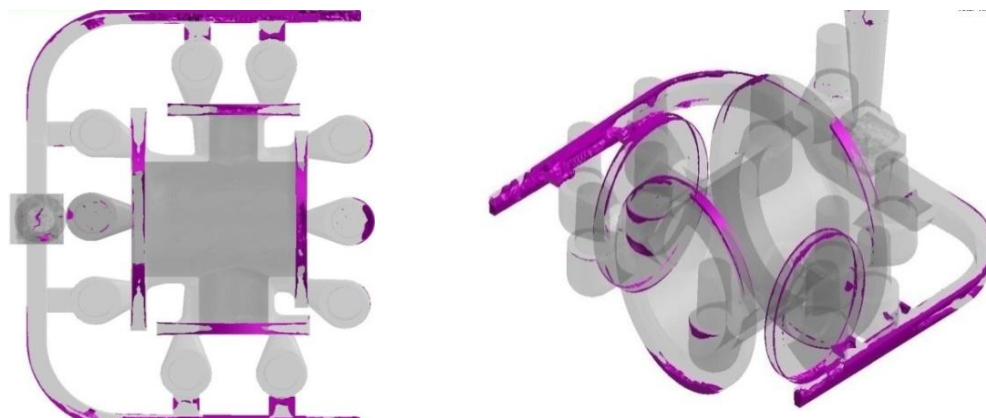


Figura 48 e 49. Análise da microporosidade, visualizada em VisualCast.

Analisando as figuras 48 e 49 é possível reparar que, mais uma vez, a microporosidade que aparece na peça está concentrada nos bordos das flanges. Desta vez e comparando com a simulação anterior, esta hipótese 9 apresenta mais microporosidade.

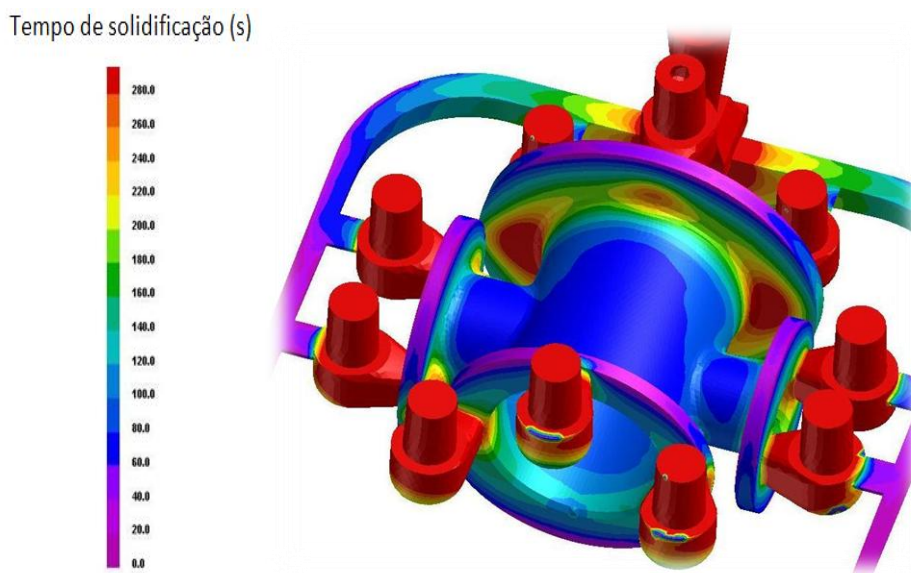


Figura 50. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.

No que diz respeito ao tempo de solidificação, as figuras 50 e 51 mostram as zonas que mais rapidamente solidificam, neste caso os bordos das flanges são os primeiros a solidificar, sendo que as zonas mais espessas serão as que demoram mais tempo.

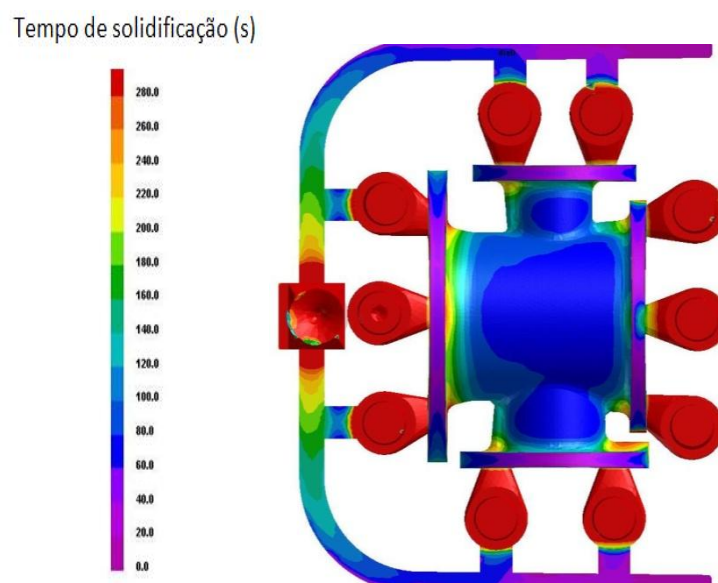


Figura 51. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.

Hipótese 10

Tabela XVIII. Parâmetros de simulação para a hipótese 10.

Nº alimentadores	Coeficientes transferência de calor nas interfaces ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)					
	Metal - camisa	Metal - areia	Camisa - areia	Areia - filtro	Filtro - Metal	Macho-peça
11	1000	1000	350	350	0	1000

Relativamente à velocidade do fluido nos ataques desta hipótese 10, será apresentada nas figuras 52 e 53 a informação respeitante ao que se passava nesta simulação.

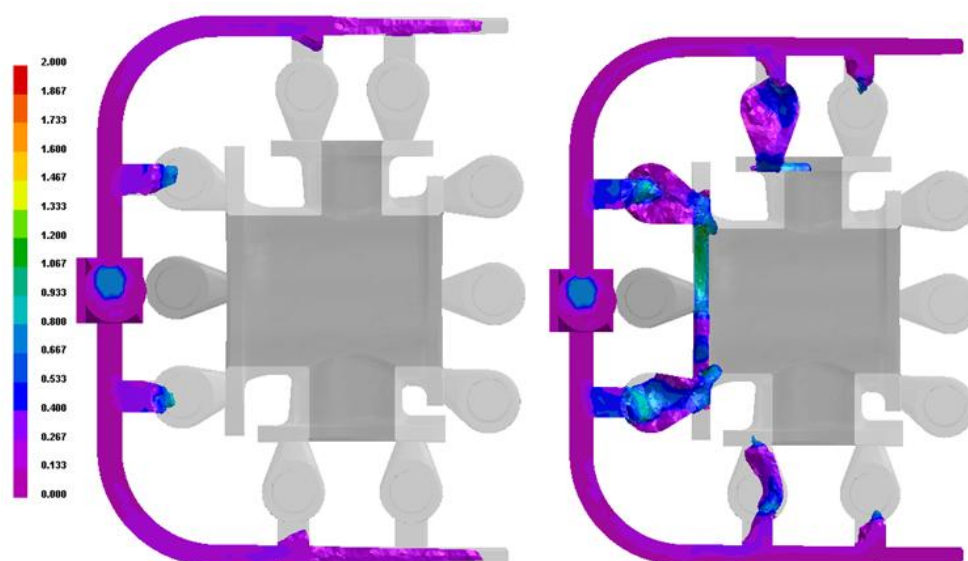


Figura 52 e 53. Velocidade do fluido nos ataques (m/s).

Pode-se verificar que inicialmente a velocidade começa bastante controlada e na ordem dos 0,2 - 0,3 m/s subindo um pouco para uma gama de velocidade na ordem dos 0,5 m/s. Este valor manteve-se no resto do enchimento da cavidade.

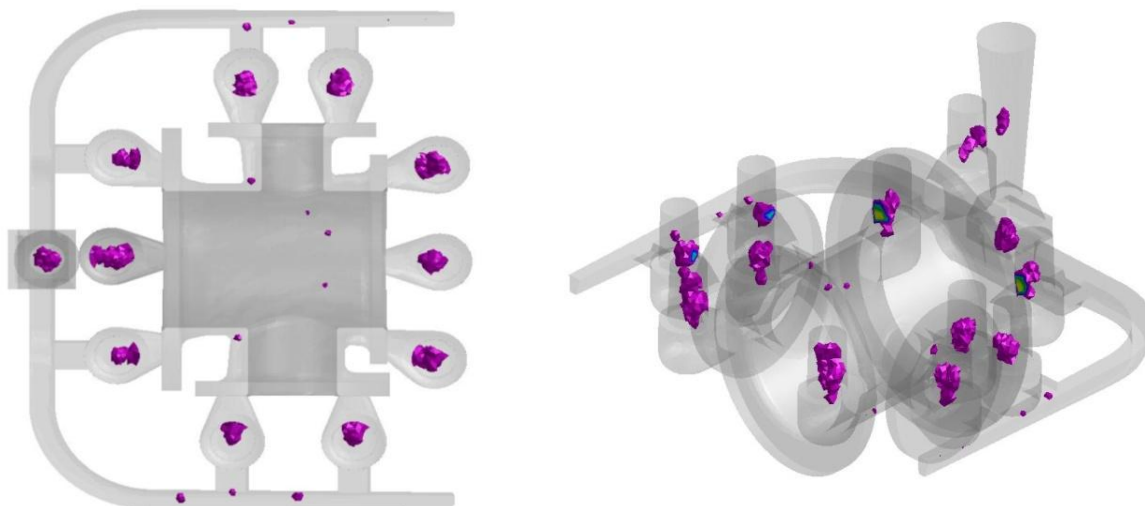


Figura 54 e 55. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.

As figuras 54 e 55 apresentam uma maior macroporosidade, sendo que nesta hipótese 10 aparecem novos pontos de macroporosidade situados na zona central da peça, na parte superior.

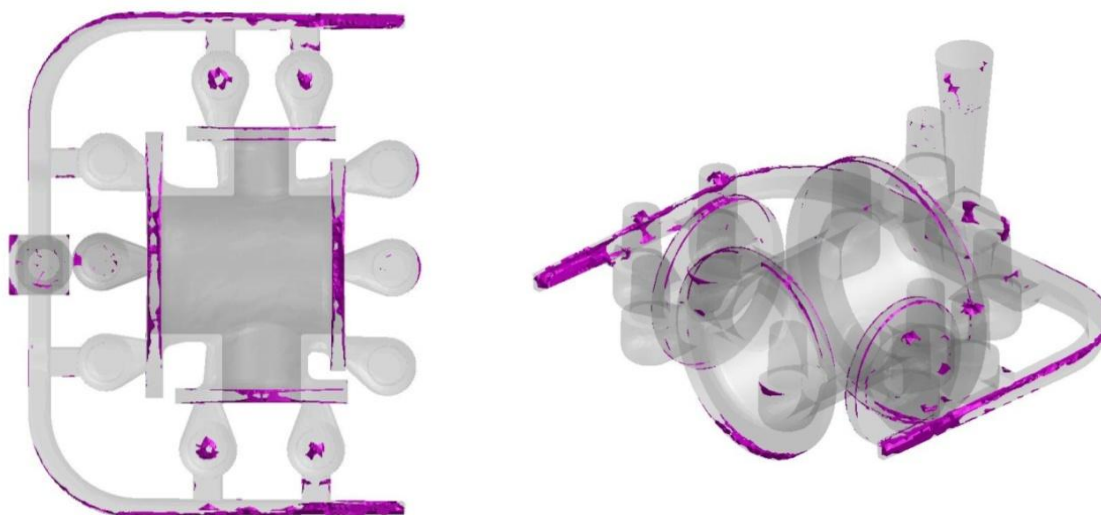


Figura 56 e 57. Análise da microporosidade, visualizada em VisualCast.

As figuras 56 e 57 apresentam microporosidade localizada nos locais já referidos em figuras anteriores, ou seja, nos bordos das flanges da peça.

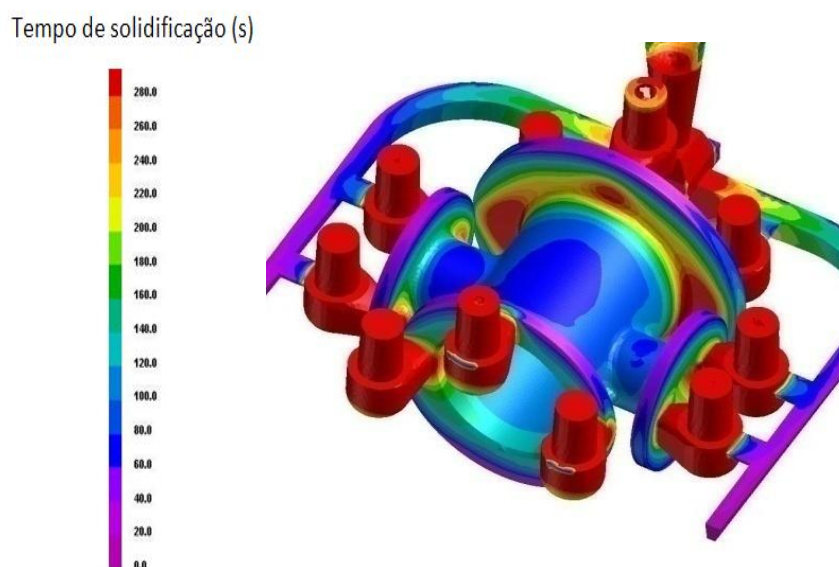


Figura 58. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.

No que diz respeito ao tempo de solidificação, mais uma vez se verifica, após análise das figuras 58 e 59, que os bordos das flanges são zonas que arrefecem muito rapidamente e que as zonas alteradas na geometria da peça têm um tempo de solidificação mais longo devido não só à sua espessura, bem como ao facto de terem alimentadores a alimentar aquela zona.

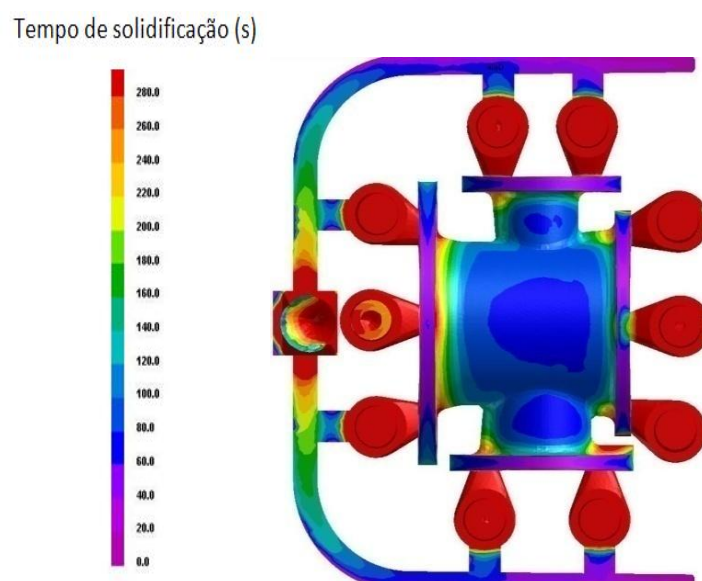


Figura 59. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.

Hipótese 11

Tabela XIX. Parâmetros de simulação para a hipótese 11.

Nº alimentadores	Coeficientes transferência de calor nas interfaces (W/m ² .K)					
	Metal - camisa	Metal - areia	Camisa - areia	Areia - filtro	Filtro - Metal	Macho-peça
11	500	500	350	350	0	500

Relativamente à velocidade do fluido nos ataques desta hipótese 11, será apresentada nas figuras 60 e 61 a informação respeitante ao que se passava nesta simulação.

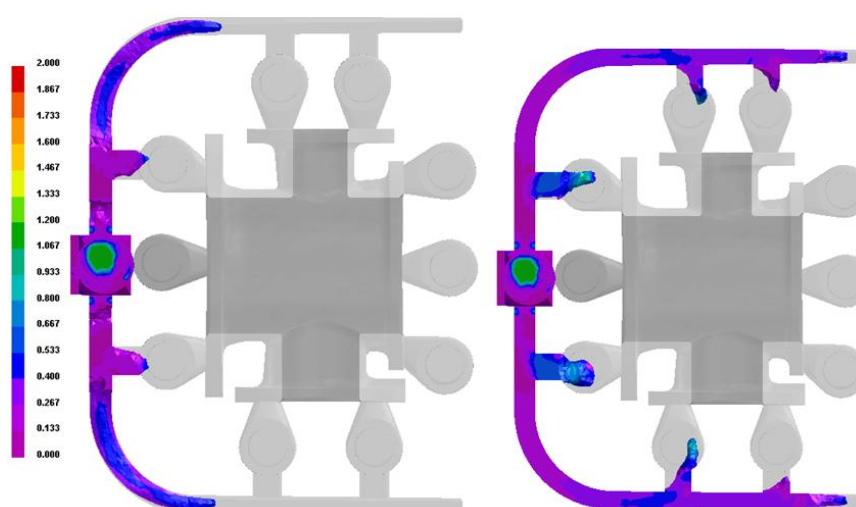


Figura 60 e 61. Velocidade do fluido nos ataques (m/s).

Inicialmente a velocidade tinha valores na ordem dos 0,3 - 0,4 m/s subindo um pouco para uma gama de velocidade na ordem dos 0,5 - 0,6 m/s. Este aumento de velocidade é explicado pela diminuição dos coeficientes de transferência de calor das interfaces. Estes valores mantiveram-se no resto do enchimento da cavidade.

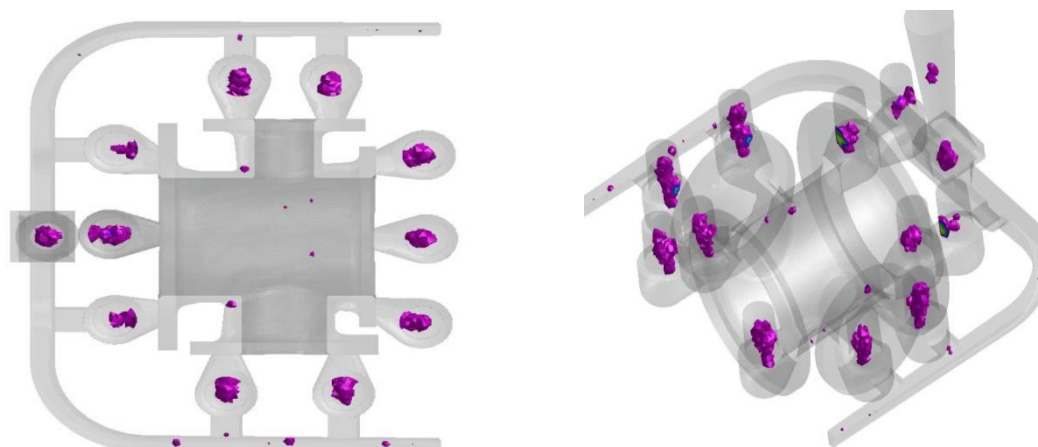


Figura 62 e 63. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.

As figuras 62 e 63 mostram a existência de macroporosidades na zona central da peça, mas com menor dimensão, quando comparados com a hipótese 10. Mais uma vez aparecem macroporosidades em duas zonas críticas da peça.

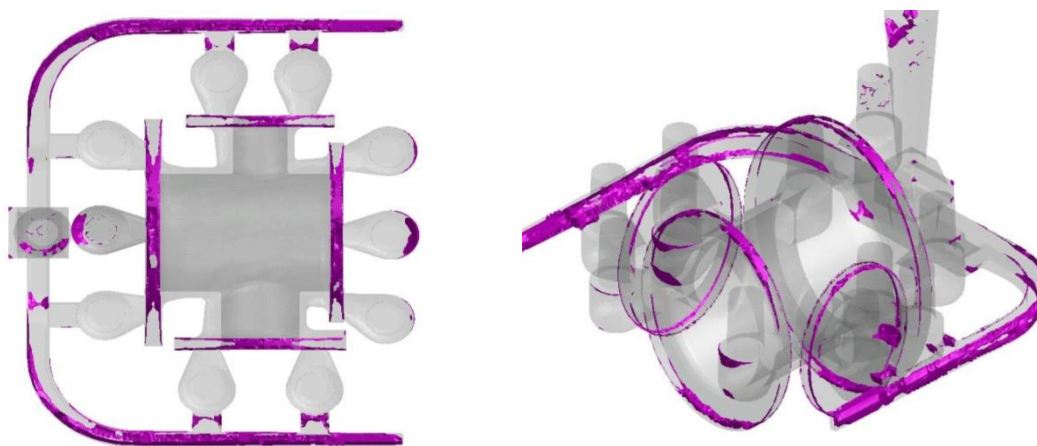


Figura 64 e 65. Análise da microporosidade, visualizada em VisualCast.

Analisando as figuras 64 e 65 é possível verificar a existência de microporosidade concentrada nos bordos das flanges, tal como acontece com as simulações anteriormente apresentadas.

As figuras 66 e 67 apresentam os mesmos aspectos que as hipóteses apresentadas na parte II dos resultados.

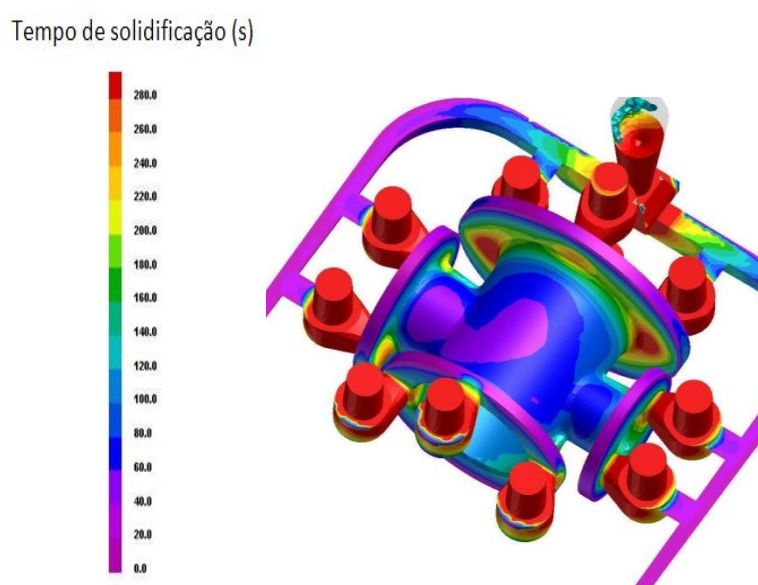


Figura 66. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.

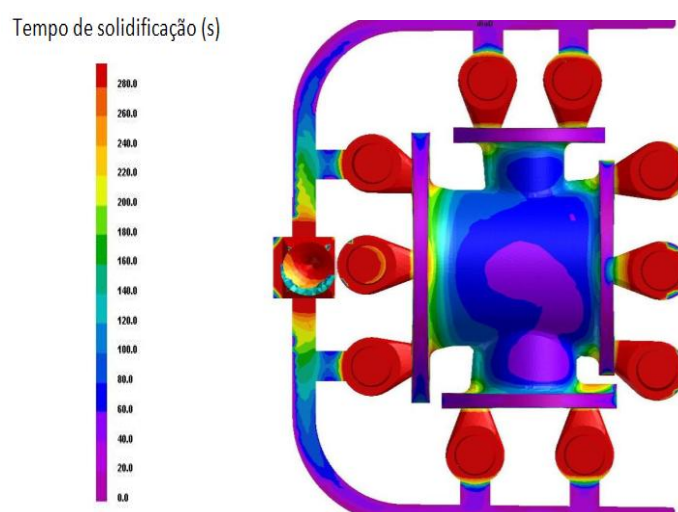


Figura 67. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.

Hipótese 12

A nível de diferenças comparativamente com a hipótese 11, a apresentada aqui varia a nível dos coeficientes de transferência de calor, que foram aumentados nas várias interfaces apresentadas na tabela XX.

Tabela XX. Parâmetros de simulação para a hipótese 12.

Nº alimentadores	Coeficientes transferência de calor nas interfaces (W/m ² .K)					
	Metal - camisa	Metal - areia	Camisa - areia	Areia - filtro	Filtro - Metal	Macho-peça
11	750	750	200	200	0	750

Relativamente à velocidade do fluido nos ataques desta hipótese 12, será apresentada nas figuras 68 e 69 a informação respeitante ao que se passava nesta simulação.

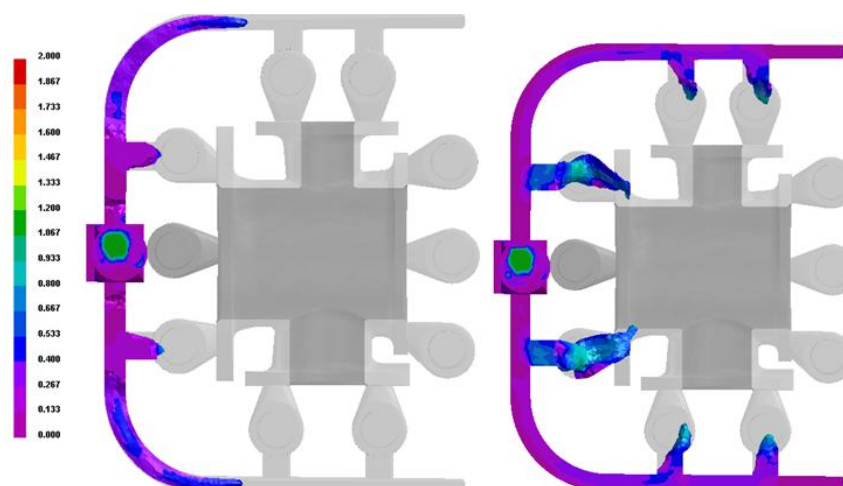


Figura 68 e 69. Velocidade do fluido nos ataques (m/s).

Tal como aconteceu na hipótese 11, também aqui inicialmente a velocidade tinha valores na ordem dos 0,3 - 0,4 m/s. No entanto com o avançar do enchimento o valor da velocidade do fluido subiu para uma gama de velocidades na ordem dos 0,6 - 0,7 m/s. Estes valores mantiveram-se no resto do enchimento da cavidade.

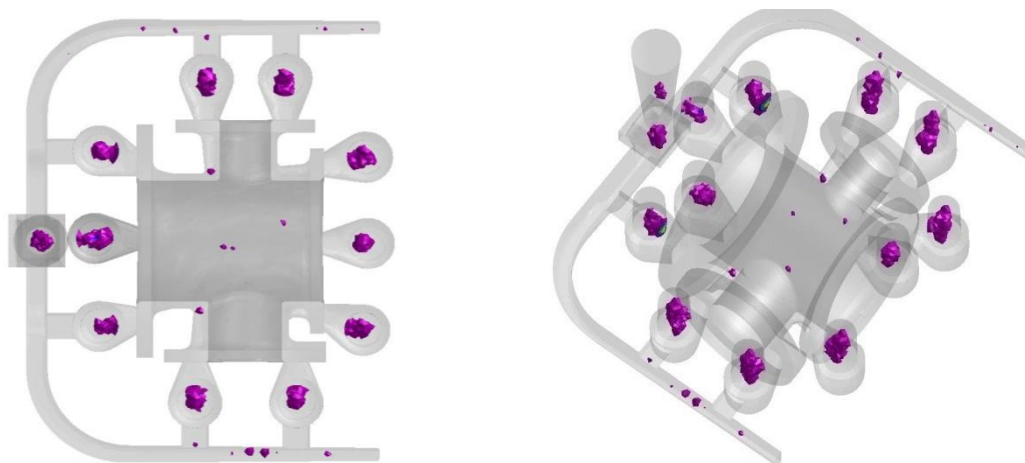


Figura 70 e 71. Análise da macroporosidade, visualizada em VisualCast.

As figuras 70 e 71 identificam macroporosidade em duas zonas críticas da peça, bem como 3 pontos na parte superior da mesma. Estes pontos identificados na zona superior da peça podem significar fissuração devido ao pequeno diâmetro que apresenta.

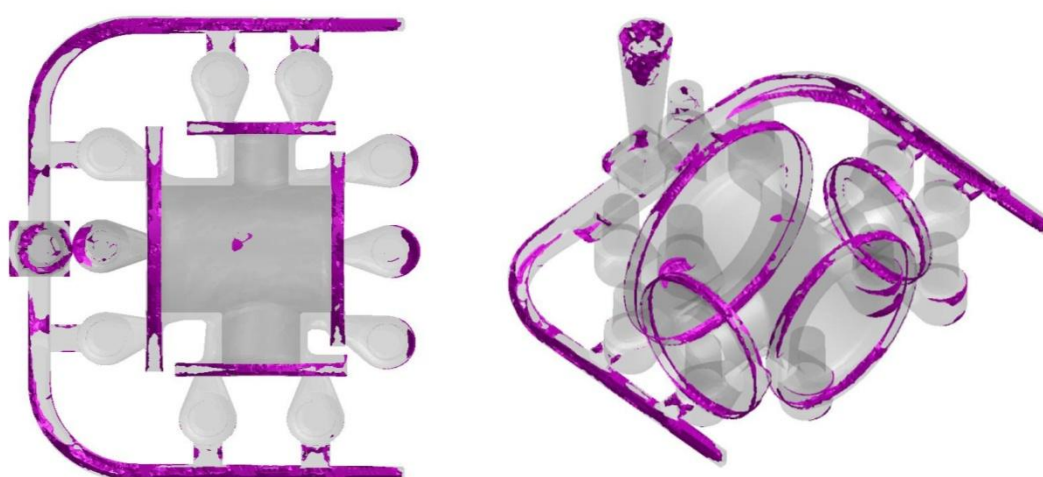


Figura 72 e 73. Análise da microporosidade, visualizada em VisualCast.

As figuras 72 e 73 identificam microporosidade nos bordos das flanges. Foi identificado também um local que possui microporosidade na zona central superior da peça, mais uma vez indicativo da possível existência de fissuras naquela zona.

Tempo de solidificação (s)

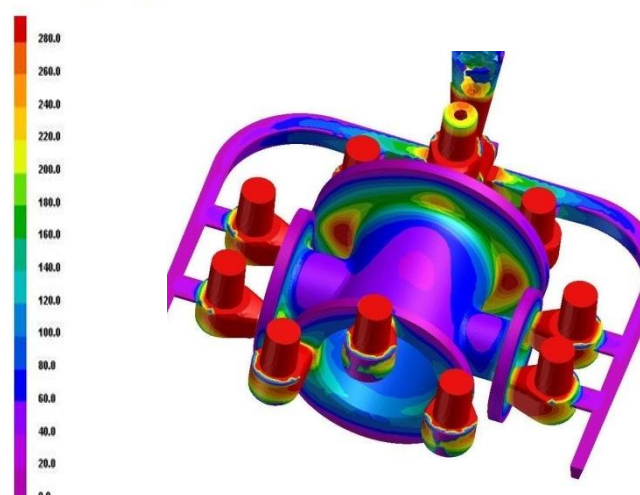


Figura 74. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.

As figuras 74 e 75 explicam em parte o porquê do aparecimento de porosidade na zona central da peça. Como se pode observar, essa zona arrefece muito rapidamente quando comparada com o resto da peça. Este facto leva a que haja uma contracção nessa zona e pode ser o motivo que conduz a que o software detecte porosidade.

O mesmo se verifica para os bordos das flanges que arrefecem também muito rapidamente no momento em que o metal líquido contacta com as paredes da moldação em areia.

Tempo de solidificação (s)

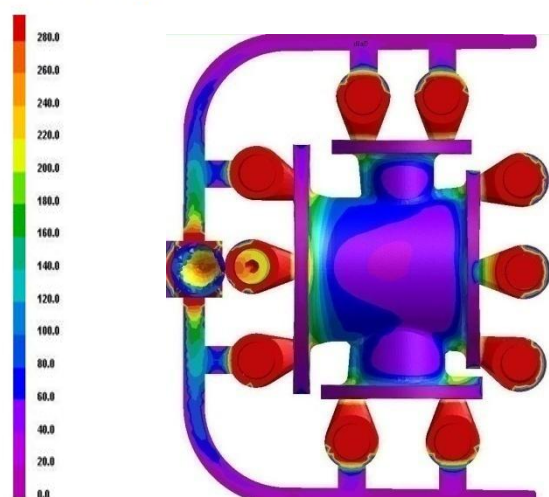


Figura 75. Tempo de solidificação visualizado em VisualCast.

5. Validação Experimental

Neste ponto serão apresentadas algumas informações relevantes acerca do vazamento, bem como algumas imagens após desmoldação (figuras 66 a 75).

O vazamento foi efectuado a uma temperatura de 1520°C por uma colher de sifão com capacidade de 600 kg. A desgaseificação foi efectuada na colher.

Serão apresentadas em seguida algumas imagens relativas ao cacho após desmoldação, bem como alguns pormenores considerados mais importantes. O cacho apresentava 11 alimentadores.

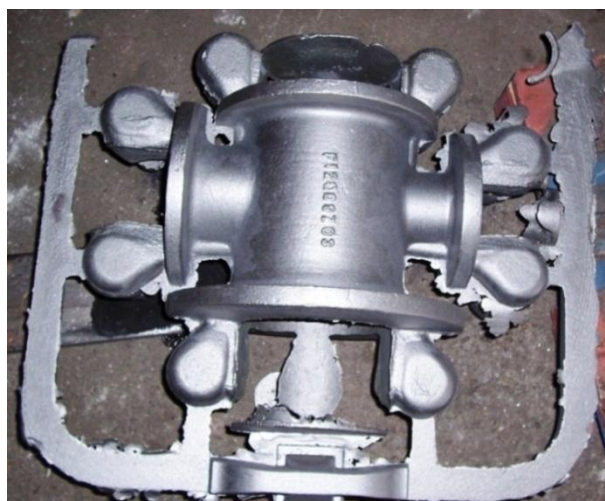


Figura 76. Cachos após desmoldação.

Como é possível verificar pela figura 66 e após análise cuidada, o cacho não possuía quaisquer problemas a nível de defeitos visuais. É possível reparar no pormenor dos alimentadores um pouco inclinados para as zonas que iriam alimentar. O objectivo desta posição seria direccionar a alimentação para aquela zona com secção fina, denominada como “zona crítica da peça” referida no ponto 4 desta tese.

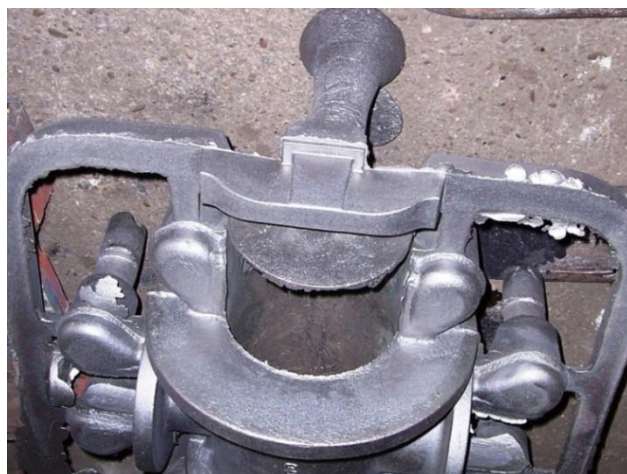


Figura 77. Pormenor do gito e poço de vazamento.

A figura 77 apresenta o poço de vazamento mais em pormenor. Esta foi a grande diferença entre a validação e o modelo simulado dado que houve um desnível entre o canal de alimentação e o poço. No que diz respeito às restantes dimensões (diâmetro do gito de descida, diâmetro dos alimentadores, etc), elas foram semelhantes às calculadas.

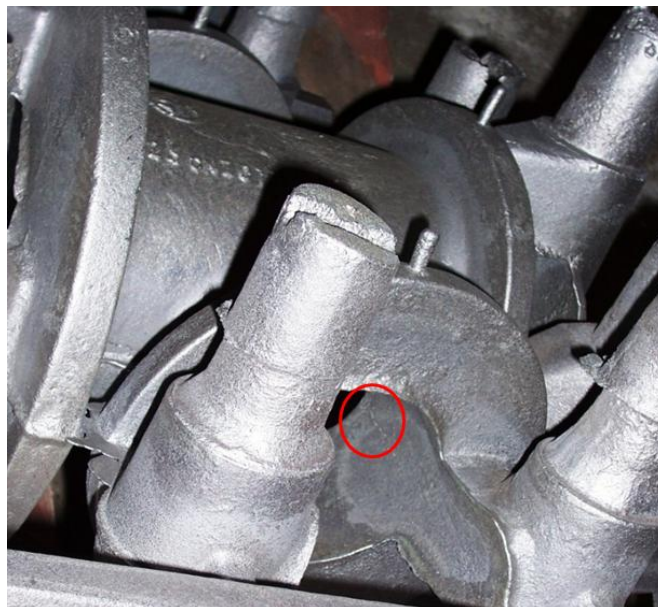


Figura 78. Pormenor de uma fissura na zona interior da peça.

Após analisar a figura 78, é possível reparar que existe uma fissura no interior da peça. Apesar de em simulação ter sido detectado macroporosidade na zona crítica, na validação aparece uma fissura nessa mesma zona.

A figura 79 apresenta a mesma zona mas com uma ampliação maior para que seja facilmente visível a fissura em questão.



Figura 79. Ampliação da zona fissurada no interior da peça.



Figura 80. Zonas fissuradas no interior da peça.

Já no caso da figura 80, a imagem revela que existe, mais uma vez fissuração nas zonas críticas identificadas em simulação, mas também numa zona central e igualmente no interior da peça.



Figura 81. Zona fissurada no interior da peça.

Novamente, aparece uma fissura nesta zona crítica, como é facilmente visível na figura 81.

As figuras 82 a 85 apresentam pormenores das flanges após maquinagem. Estas flanges são identificadas de acordo com a figura 12, referida no ponto 5.3 desta tese.



Figura 82. Pormenor da flange W após maquinagem.

A figura 82 mostra que após maquinagem não é visível qualquer porosidade a nível dos bordos da flange.

Analisando visualmente as figuras 83 e 84, pode-se constatar que as flanges X e Y não apresentam porosidades nos seus bordos.



Figura 83. Pormenor da flange X após maquinagem.



Figura 84. Pormenor da flange Y após maquinagem.

A figura 85 indica uma inexistência de microporosidade, que se traduz numa boa qualidade a nível superficial da flange Z.



Figura 85. Pormenor da flange Z após maquinagem.

6. Conclusões

Como conclusões deste trabalho, podem-se tirar algumas ilações relativamente ao potencial deste software, à sua aplicabilidade na indústria da fundição e à sensibilidade que ele possui para detecção de problemas de fundição.

Quanto à aplicabilidade convém dizer que a curva de aprendizagem deste software é um pouco longa, dado que após estes meses de utilização do mesmo, existe muito para adquirir até usar todo o seu potencial. É necessário ter em conta que além da atribuição de parâmetros de simulação, que foram os mais discutidos nesta tese, é no malhamento onde o utilizador perde mais tempo em frente ao computador. Este passo que antecede a simulação é efectuado no módulo MeshCast. Para a obtenção de resultados que traduzam a realidade é necessário que a manipulação da malha seja feita sem qualquer erro por dois motivos: o primeiro é que se houver algum erro, o software detecta-o e não é possível avançar para o módulo de pré-processamento, onde se introduzem todos os parâmetros físicos do modelo a utilizar; o segundo motivo será que mesmo no caso de conseguir efectuar a malha tetraédrica no MeshCast, esta poderá ter intersecções não detectáveis no software e, posteriormente, ao efectuar a simulação esta ou dará erro ou então na visualização dos resultados finais, será possível verificar a ocorrência de fenómenos inesperados como um fluxo com escoamento anormal. Todos estes pormenores deverão ser tidos em conta para que se tenha atenção redobrada neste passo inicial e fundamental: o malhamento.

No que diz respeito ao tamanho de malha, deverá ser escolhido de maneira a que na zona com secção mais fina da peça, existam pelo menos 3 tetraedros a cobrir essa zona. Se isto não acontecer corre-se o risco dos resultados obtidos não traduzirem a realidade devido a um malhamento demasiadamente grosseiro.

A nível de resultados obtidos nas simulações, estes podem ser divididos nas partes I e II. A primeira parte será aquela que contém os resultados obtidos numa fase inicial de aprendizagem do software ProCast, daí que sejam claramente díspares quando comparados com os apresentados na parte II. Estes resultados da parte II contêm já algum “*know how*” que considero ter grande importância para futuras utilizações deste software já que além da experiência ganha neste tempo de aprendizagem do software, incluiu também alguma informação proveniente do próprio apoio técnico da ESIGROUP, como é o caso das gamas de valores a serem atribuídos nos coeficientes de transferência de calor (HTC), bem como algumas sugestões para tornar o mais real possível as simulações efectuadas.

Como se pode verificar pelas tabelas apresentadas na parte II, estas possuem já valores de HTC para as diversas interfaces, coisa que não acontece nas tabelas

apresentadas na parte I. Além disto, a malha utilizada nas simulações da parte II está já com um valor que permite a obtenção de resultados mais realistas dado que o valor desta é suficientemente pequeno para detectar pequenas irregularidades.

No que diz respeito aos melhores resultados obtidos, estes aparecem descritos na hipótese 9 onde aparecem macroporosidades em duas zonas críticas da peça. É possível afirmar que nas simulações realizadas se torna difícil melhorar a alimentação desta peça de forma a garantir a sua completa sanidade.

O objectivo da alteração da geometria da peça seria aumentar o caminho da alimentação naquelas zonas, tidas como “zonas críticas” dado que possuíam baixa espessura e eram de importância vital para alimentar a peça. Houve, de facto, melhorias após a alteração da geometria da peça mas, pelas simulações efectuadas, não foi considerado suficiente.

Quanto às velocidades do fluido nos ataques, estas ultrapassaram um pouco os valores recomendados pela bibliografia, que deveriam rondar os 0,4 m/s. A hipótese 12 foi aquela em que foi atingida uma maior velocidade nos ataques, devido ao facto dos valores HTC utilizados. Daqui facilmente se percebe que estes valores têm influência a nível de escoamento do líquido durante o enchimento uma vez que se referem à transferência de calor entre as várias interfaces da simulação.

A nível de validação experimental, as zonas fissuradas da peça são as zonas onde, em simulação, apresentam macroporosidade. Já foi dito nesta tese que este defeito não se deve a uma falta de alimentação naquelas zonas da peça mas sim ao arrastamento de óxidos na entrada do banho metálico na cavidade moldante. Este facto é concordante com a teoria apresentada na revisão bibliográfica.

Após maquinaria, foi facilmente perceptível que a microporosidade indicada na simulação não se traduziu a nível experimental. Tal facto significa que o valor utilizado para verificar as porosidades da peça, sejam elas macro ou microporosidade foi um pouco elevado. Este valor, o *shrinkage porosity*, deve então ser utilizado em valor inferior a 2% para que seja possível detectar de uma forma mais realistas os defeitos que, na verdade, aparecem após vazamento.

Resumidamente pode concluir-se que a simulação que apresentou resultados mais realistas foi a hipótese 8 dado que apresentava macroporosidade em duas zonas críticas e na parte superior da peça, zonas estas que exteriormente se traduziram em fissuração e a nível de microporosidade detectaram alguma nos bordos das flanges. Como foi a hipótese cuja microporosidade detectada foi em menor quantidade, julga-se que talvez seja a que mais se aproxima da validação.

Pode-se então afirmar que um dos objectivos foi atingido dado que a formulação indicada eliminou a porosidade das flanges. No entanto existe ainda um problema de fissuração nas zonas críticas da peça.

A nível de utilizações futuras para a liga utilizada, os valores de coeficiente de transferência de calor utilizados na hipótese 8 são um bom ponto de partida mas para uma correcta utilização teriam que ser sempre verificados por validação experimental de modo a “afinar” o software com a realidade.

Referências bibliográficas

- [1] D. Koshal, Manufacturing Engineer's Reference Book, Cap. 3 - Metal Casting and Molding Processes, 3.2 Sand Casting, Elsevier, 1993;
- [2] Carlos E. Esparza, Martha P. Guerrero-Mata, Roger Z. Ríos-Mercado, Optimum Design of Gating Systems by Gradient Search Methods, 2004;
- [3] Flemings, Solidification Processing, Materials Science and Engineering Series, Cap. 7 - Fluid Flow, McGraw-Hill, 1974;
- [4] ASM Metals Handbook, Volume 15 - Casting, Cap. Design Considerations, Gating Design, 1992;
- [5] John Campbell, Castings Practice - The 10 rules of castings, Cap. 2 - Avoid turbulent entrainment, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004;
- [6] [Http://www.esi-group.com/products/casting/procast](http://www.esi-group.com/products/casting/procast), acedido em 11 de Dezembro de 2008;
- [7] ESIGROUP, "ProCast User Manual", Versão 2008.0;
- [8] ESIGROUP, "MeshCast User Manual", Versão 2008.0;
- [9] ESIGROUP, "Visual- CAST V3.0 Tutorials" ;

Anexos

Tabela XXI. Valores referentes à análise de forma da peça.

Secção	A (mm)	B (mm)	X (mm)	Módulo (cm)	Do	e'
cilindro 1	∞	20	198	0,63	5,7	1,9
cilindro 2	∞	18	88	0,54	4,9	1,63
cilindro 3	∞	18	118	0,56	5	1,6
bordo X	∞	17	170	0,54	4,9	1,62
bordo Y	∞	16	120	0,5	4,5	1,5
bordo Z	∞	16	120	0,5	4,5	1,5
bordo W	∞	15	94	0,46	4,2	1,5

Tabela XXII. Valores referentes à espessura equivalente das junções com respectivos módulos.

Junções	e''	e'' * 1,2	M= 0,249D
cilindro 1 com bordo X	1,17	1,4	D = 56mm
cilindro 2 com bordo Y	1,09	1,3	D = 52mm
cilindro 3 com bordo Z	1,11	1,3	D = 52 mm
cilindro 1 com bordo W	1,27	1,5	D = 60 mm

Nota: 1,2 é a multiplicação entre o factor de posição e o tipo de liga.

Na tabela XXII é possível reparar que a espessura equivalente das junções é multiplicada pelo valor 1,2 referente ao tipo de liga utilizado. A partir desse valor é possível obter o valor dos alimentadores a usar, para cada secção. Obviamente que na prática foi estabelecido o valor de 55mm para o diâmetro dos alimentadores a usar para todas as secções.

Cálculo do sistema de alimentação e gitagem

As tabelas apresentadas de seguida contêm os valores calculados para que fosse possível a modelação do gito de descida e ataques.

Relação do sistema de gitagem: 1 : 1,1 : 1,2

A scsg = 2,7 cm²

Diâmetro da base do gito de descida = 18,6 cm²

Tabela XXIII. Valores calculados para o gito de descida.

GITO DESCIDA	Altura total = 250mm	
Altura da bacia	100mm	
Diâmetro da bacia	100 mm	
Área superior gito descida	4,9 cm ²	D= 23mm
Área inferior gito descida=Ascsg	2,7 cm ²	D=18,5mm
Diâmetro poço	60 mm	
Altura gito descida	150 mm	

Tabela XXIV. Valores calculados para os canais de distribuição.

CANAL DISTRIBUIÇÃO	Forma: trapézio	Área: 2,97 cm ²
Altura	20 mm	
Largura maior	20 mm	
Largura menor	9 mm	

Tabela XXV. Valores calculados para os ataques.

ATAQUES	Forma: trapézio	Área: 3,24 cm ²
Altura	9,5 mm	
Largura maior	38 mm	
Largura menor	30 mm	